

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství

Katedra materiálového inženýrství

DIPLOMOVÁ PRÁCE

VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA

FAKULTA METALURGIE A MATERIÁLOVÉHO INŽENÝRSTVÍ

KATEDRA MATERIÁLOVÉHO INŽENÝRSTVÍ

Svařování austenitických ocelí

Welding of Austenitic Steels

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Jiří Mihula**
Studijní program: N3923 Materiálové inženýrství
Studijní obor: 3911T036 Progresivní technické materiály
Téma: Svařování austenitických ocelí
Welding of Austenitic Steels
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

Teoretická část:

- austenitické a korozivzdorné materiály
- svařování a svařitelnost austenitických ocelí; chemické složení; vliv prvků
- provozní degradace exponovaných komponent s důrazem na svarové spoje
- defekty svarových spojů austenitických ocelí
- vybrané NDT a destruktivní metody zkoušení a hodnocení svarových spojů

Praktická část:

- hodnocení degradace a životnosti exponované komponenty chemického průmyslu
- možnosti a účinnost oprav
- zkoušení mechanických vlastností, metalografie

Diskuze; závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] KOUKAL, J., SCHWARZ, D., HAJDÍK, J.: Materiály a jejich svařitelnost, Ostrava: 2009
[2] PORTER D. A., ESTERLING, K. E., SHERIF M. Y.: Phase Transformations in metals and alloys, Third edition, CRC Press 2009
[3] PLUHAR, J. a kol.: Nauka o materiálech, SNTL/ALFA, Praha 1989
[4] McEVILLY, A. J.: Metal Failures, Mechanism, Analysis, Prevention, WILEY 2013.

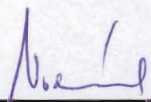
Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

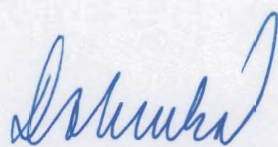
Vedoucí diplomové práce: **Ing. Martin Kraus, Ph.D.**

Datum zadání: 30.11.2015

Datum odevzdání: 12.05.2016




prof. Ing. Vlastimil Vodárek, CSc.
vedoucí katedry


prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.
děkanka fakulty

Zásady pro vypracování diplomové práce

I.

Diplomovou prací (dále jen DP) se ověřují vědomosti a dovednosti, které student získal během studia, a jeho schopnosti využívat je při řešení teoretických i praktických problémů.

II.

Uspořádání diplomové práce:

- | | |
|--|------------------------------|
| 1. Titulní list | 6. Obsah DP |
| 2. Originál zadání DP | 7. Textová část DP |
| 3. Zásady pro vypracování DP | 8. Seznam použité literatury |
| 4. Prohlášení + místopřísežné prohlášení | 9. Přílohy |
| 5. Abstrakt + klíčová slova česky a anglicky | |

ad 1) Titulní list je koncipován podle požadavků příslušné oborové katedry.

ad 2) Originál zadání DP student obdrží na své oborové katedře.

ad 3) Tyto „Zásady pro vypracování diplomové práce“ následují za originálem zadání DP. („Zásady pro vypracování diplomové práce“ jsou ke stažení na webových stránkách fakulty).

ad 4) Prohlášení + místopřísežné prohlášení napsané na zvláštním listu (ke stažení na webových stránkách fakulty) a vlastnoručně podepsané studentem s uvedením data odevzdání DP. V případě, že DP vychází ze spolupráce s jinými právníky a fyzickými osobami a obsahuje citlivé údaje, je na zvláštním listě vloženo prohlášení spolupracující právnické nebo fyzické osoby o souhlasu se zveřejněním DP.

ad 5) Abstrakt a klíčová slova jsou uvedena na zvláštním listu česky a anglicky v rozsahu max. 1 strany pro obě jazykové verze.

ad 6) Obsah DP se uvádí na zvláštním listu. Zahrnuje názvy všech očíslovaných kapitol, podkapitol a statí textové části DP, odkaz na seznam příloh a seznam použité literatury, s uvedením příslušné stránky. Předpokládá se desetinné číslování.

ad 7) Textová část DP obvykle zahrnuje:

- Úvod, obsahující charakteristiku řešeného problému a cíle jeho řešení v souladu se zadáním DP;
- Vlastní rozpracování DP (včetně obrázků, tabulek, výpočtů) s dílčími závěry, vhodně členěné do kapitol a podkapitol podle povahy problému;
- Závěr, obsahující celkové hodnocení výsledků DP z hlediska stanoveného zadání.

DP bude zpracována v rozsahu min. cca 45 stran (včetně obsahu a seznamu použité literatury). V případě, kdy zadání DP vychází ze spolupráce se subjekty mimo VŠB -TU Ostrava a řešení studenta, týkající se citlivých dat spolupracujícího subjektu, je zpracováno v samostatné zprávě. tak zveřejněná část DP bude zpracována v rozsahu min. 25 stran a celkový rozsah DP bude min. 45 stran.

Text musí být napsán vhodným textovým editorem počítače po jedné straně bílého nelesklého papíru formátu A4 při respektování následující doporučené úpravy - písmo Times New Roman 12b; řádkování 1,5; okraje - horní, dolní – 2,5 cm, levý 3 cm, pravý 2 cm, zarovnání do bloku. Fotografie, schémata, obrázky, tabulky musí být očíslovány a musí na ně být v textu poukázáno.

Budou zařazeny průběžně v textu, pouze je-li to nezbytně nutné, jako přílohy (viz ad 9). Odborná terminologie práce musí odpovídat platným normám. Všechny výpočty musí být přehledně uspořádány tak, aby každý odborník byl schopen přezkoušet jejich správnost. Matematické vzorce musí být číslovány (v kulatých závorkách). U vzorců, údajů a hodnot převzatých z odborné literatury nebo z praxe musí být uveden jejich pramen - u literatury citován číselným odkazem (v hranatých závorkách) na seznam použité literatury. Nedostatky ve způsobu vyjadřování, nedostatky gramatické, neopravené chyby v textu mohou snížit klasifikaci práce.

ad 8) DP bude obsahovat alespoň 15 literárních odkazů, z toho nejméně 5 v některém ze světových jazyků.

Seznam použité literatury se píše na zvláštním listě. Citaci literatury je nutno uvádět **důsledně v souladu s ČSN ISO 690**. Na práce uvedené v seznamu použité literatury musí být uveden odkaz v textu DP.

ad 9) Přílohy budou obsahovat jen ty části (speciální výpočty, zdrojové texty programů aj.), které nelze vhodně včlenit do vlastní textové části např. z důvodu ztráty srozumitelnosti.

III.

Diplomovou práci student odevzdá ve dvou knihařsky svázaných vyhotoveních, pokud katedra garantující studijní obor neurčí jiný počet. Vnější desky budou označeny takto:

nahore: *Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava*
Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství
Katedra

uprostřed: *DIPLOMOVÁ PRÁCE*

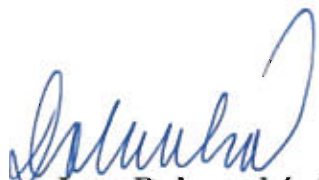
dole: *Rok* *Jméno a příjmení*

Kromě těchto dvou knihařsky svázaných výtisků odevzdá student kompletní DP také v elektronické formě do IS EDISON. Práce vložená v elektronické formě do IS EDISON se musí zcela shodovat s prací odevzdanou v tištěné formě. Po vložení DP do IS EDISON bude provedena její kontrola na plagiátorství.

IV.

Nesplnění výše uvedených zásad pro vypracování diplomové práce může být důvodem nepřijetí práce k obhajobě. O nepřijetí práce k obhajobě rozhoduje v tomto případě garant příslušného studijního oboru. Tyto zásady jsou závazné pro studenty všech studijních programů a forem navazujícího magisterského studia Fakulty metalurgie a materiálového inženýrství Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava od akademického roku 2015/2016.

Ostrava 2. 11. 2015


Prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.
děkanka Fakulty metalurgie a materiálového inženýrství
VŠB-TU Ostrava

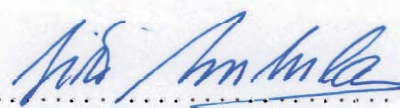
PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- jsem byl(a) seznámen(a) s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména §35 - užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního (§60 - školní dílo);
- беру на ве́домі, že Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB - TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3);
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude archivována v elektronické formě v databázi Ústřední knihovny VŠB - TUO a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO;
- bylo sjednáno, že s VŠB - TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona;
- bylo sjednáno, že užít své dílo - diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB - TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB - TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- беру на ве́домі, že odevzdáním své diplomové práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (Zákon o vysokých školách) bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Místopřísežně prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci vypracoval(a) samostatně.

V Ostravě 2.5.2016


.....
podpis (jméno a příjmení studenta)

Poděkování

Rád bych poděkoval svému vedoucímu práce Ing. Martinu Krausovi, Ph.D. za odborné vedení a pomoc při zpracování této diplomové práci. Zároveň bych chtěl poděkovat Ing. Heleně Maternové za cenné informace, připomínky a čas, který mi věnovali při jejím zpracování. Paní Naděždě Brychtové za odborné vedení při laboratorních pracích. V neposlední řadě chci poděkovat své rodině za podporu a pochopení.

Tato diplomová práce vznikla za přispění projektů Studentské grantové soutěže SP 2016/103 Specifický výzkum v metalurgickém, materiálovém a procesním inženýrství a SP2016/111 Studium vztahů mezi strukturními parametry a vlastnostmi pokročilých materiálů.

Abstrakt: Tato práce je zaměřena na vlastnosti korozivzdorných materiálů se zvláštním důrazem na aspekt jejich svařitelnosti pomocí různých metod, jmenovitě pomocí svařování elektrodou, metodou MIG, MAG a TIG. Detailní pozornost je věnována dopadu metalurgických pochodů při svařování, vlivu teplotního cyklu, aspektům tepelně ovlivněné oblasti a vadám, které se ve svaru mohou vyskytnout. Práce v praktické části soustřeďuje pozornost na metodiku provedené opravy sledovaného aparátu a zhodnocení správnosti použitého postupu s přihlédnutím ke stanovení příčin lomového porušení aparátu, jak za provozních podmínek, tak také po provedené opravě.

Klíčová slova:

korozivzdorné materiály, svařování, životnost, degradace, koroze, tepelně ovlivněná oblast, vady

Abstract: This work is focused on properties with a special corrosion-resistant materials emphasis on the aspect of their weldability using different methods, namely using electrode welding, MIG, MAG and TIG. Detailed attention is discusses the impact of metallurgical processes in welding, thermal influence cycle, aspects of the heat affected zone and defects, which may in contention occur. Working in the practical section focuses attention on methodology repairs reporting system and evaluate the correctness of the procedure with regard to determining the causes of fracture violation apparatus as under the operating conditions and also after repair.

Keywords:

corrosion-resistant materials, welding, service life, degradation, corrosion, heat affected zone, defects

Obsah

1 Úvod	5
2 Rozdělení korozivzdorných materiálů	6
2.1 Martenzitické	7
2.2 Feritické	8
2.3 Austenitické	9
2.4 Austeniticko – feritické	10
3 Svařitelnost austenitických ocelí	11
3.1 Vznik σ -fáze	11
3.2 Tepelně krystalizační trhliny	12
3.3 Koroze u svarů	14
3.3.1 Mezikrystalová koroze korozivzdorných ocelí	15
3.3.2 Chemické složení	19
3.3.3 Vliv doby žhánání způsobujícího zcitlivění	19
3.3.4 Vliv stabilizačních prvků	20
3.3.5 Vliv tepelného zpracování a mechanického zpracování	21
4 Metody svařování austenitických ocelí	22
4.1 Svařování elektrodou	22
4.1.1 Princip a charakteristika oblouku	22
4.1.2 Svařovací zdroje proudu	23
4.1.3 Přídavný materiál	24
4.2 Svařování metodou TIG	25
4.2.1 Princip metody TIG	26
4.2.2 Svařovací proud	26
4.2.3 Nejdůležitější zásady při svařování metodou TIG	27
4.2.4 Svařování vysokolegované austenitické oceli metodou TIG	27

4.2.5 Ochranné plyny	28
4.2.6 Přídavné materiály	28
4.3 Svařování metodou MIG a MAG	29
4.3.1 Princip metody MIG	29
4.3.2 Princip metody MAG	30
4.3.3 Ochranné plyny	30
4.3.4 Přídavný materiál	31
5 Metalurgické pochody při svařování	32
5.1 Teplotní cyklus	32
5.2 Přeměny v tepelně ovlivněné oblasti	32
5.3 Jednovrstvé a vícevrstvé svařování	33
5.4 Typy vad, příčiny jejich vzniku a hodnocení	34
5.5 Typy vad při svařování	34
5.6 Příčiny vzniku vad	34
5.7 Hodnocení vad	37
6 Odebírání vzorků	38
7 Praktická část	39
7.1 Odebrané vzorky	39
7.2 Vizuelní prohlídka víka	39
7.3 Ocel 1.4306	39
7.4 Tahová zkouška	42
7.5 Světelná metalografie	43
7.6 Chemické složení	48
7.7 Opravný svar	52
7.8 Řádkovací elektronový mikroskop (SEM)	62
8 Závěr	66

9 Literatura	68
--------------------	----

1 Úvod

Vzhledem k tomu, že spotřeba korozivzdorných materiálů neustále vzrůstá a s tím i vzniká potřeba materiály spojovat. Jednou z cest je svařování, s kterými vznikají i značná rizika. Přestože korozivzdorná ocel je materiál s dobrou svařitelností, je potřeba dodržovat předepsané postupy a metody svařování, především volbu přídavných materiálů a ochranných plynů. Velice důležité jsou i dokončovací práce, aby byl zajištěn kvalitní svar, vzhledem k jeho pevnosti a tažnosti, ale také jeho odolnosti proti korozi. Důležitá je také správná volba odpovídajícího druhu korozivzdorných materiálů, vzhledem k prostředí, ve kterém bude používán.

Předmětem této práce je zhodnocení opravených svarů na víku odparky (aparátu E1401), ve které se zahušťuje dusičnan amonný. Víko nádoby bylo v provozu dvacet dva let. Tato práce o opravě svarů, bude podkladem pro další podobné opravy na aparátech, které dlouhodobě pracují za podobných podmínek, aby byla zajištěna bezpečnost provozovaných aparátů, ale i proto, že další odstavení provozu v důsledku špatné opravy nevyhovujícího aparátu, by bylo velkou ekonomickou ztrátou.

Práce je tematicky dělena do dvou základních kapitol. První část je věnována teoretickému rozboru jednotlivých materiálů a jejich svařitelnosti různými metodami, jako jsou svařování elektrodou, metodou MIG, MAG a TIG. Dále jsou zde popsány metalurgické pochody při svařování, teplotní cyklus, tepelně ovlivněná oblast a vady, které se mohou ve svaru vyskytnout.

Praktická část se věnuje analýze provedených oprav na aparátu E 1401, u kterého došlo k lomovému porušení po dlouholetém provozu (22 let). Cílem této práce je zhodnotit a objektivně posoudit postup při opravě aparátu a stanovit, zda použitý postup byl adekvátně zvolen a veškeré jeho náležitosti vedly ke skutečně bezchybné opravě. Za účelem této objektivní analýzy se práce soustřeďuje na hodnocení a rozbor lomových charakteristik porušení materiálu po proběhlé opravě, s přihlédnutím k provozním podmínkám řešeného aparátu. Konečným cílem této práce je získat hodnotné poznatky o řešeném problému a na základě jejich rozboru stanovit chybné kroky použité metodiky a vyvodit z těchto zjištění adekvátní bezporuchový postup pro budoucí řešení stejného problému na jiném aparátu.

2 Rozdělení korozi-vzdorných materiálů

Vysokolegované oceli obsahují více než 10 hm. % celkového obsahu legujících prvků.

Vyrábí se pro:

- Zlepšení korozních vlastností
- Zlepšení žárovevých vlastností
- Zlepšení žáruvzdorných vlastností
- Zlepšení vlastností za nízkých teplot
- Zvýšení odolnosti proti opotřebení
- Dosažení zvláštních elektrických nebo magnetických vlastností

Do korozi-vzdorných ocelí, řadíme oceli schopné pasivace, které odolávají elektrochemické korozi v oxidačním prostředí. Nutnou podmínkou pro schopnost pasivace je obsah chromu v tuhém roztoku nad cca 12 hm. %, v závislosti na obsahu uhlíku. Žáropevné oceli odolávají creepu (tečení) při vyšších teplotách, tj. vyznačují se vysokými hodnotami meze pevnosti při tečení. Žáropevné vlastnosti jsou zajištěny legujícími prvky jako: Cr, V, Mo, W, Nb, B a N. Tyto legující prvky zpomalují degradaci mechanických vlastností při zvýšených teplotách a výrazně precipitačně zpevňují tuhý roztok disperzními precipitáty. [1]

Důležité legující prvky je možné rozdělit do dvou hlavních skupin:

- Austenitotvorné, které rozšiřují v rovnovážném diagramu oblast
 γ : C, Ni, Cu, Mn, N
- Feritotvorné, které zužují v rovnovážném diagramu oblast
 γ : Cr, Mo, Si, Al, W, Ti, Nb, V

Podle obsahu hlavních legujících prvků a dosažené mikrostruktury je můžeme dále rozdělit:

- Feritické chromové oceli.
- Martenzitické chromové oceli.
- Austenitické Cr-Ni, nebo Cr-Ni-Mo oceli.
- Austeniticko-feritické (duplexní) Cr-Ni, nebo Cr-Ni-Mo oceli.

Svařování korozivzdorných ocelí je náročné, neboť proti nízkolegovaným mají větší tepelnou roztažnost, vyšší elektrický odpor, ale naopak menší tepelnou vodivost. Z těchto důvodů musíme přistupovat ke každému typu oceli individuálně. Přesto však existují určitá pravidla a doporučení pro zlepšení svařitelnosti jednotlivých typů korozivzdorných materiálů.

2.1 Martenzitické

Martenzitické korozivzdorné oceli mají tetragonální prostorově středěnou mřížku značenou α' , která vzniká díky vysokému obsahu chromu i při malých ochlazovacích rychlostech. Obsah chromu se v těchto ocelích pohybuje v rozmezí 12 až 18 % a obsah uhlíku od 0,1 do 1 %. Obrázek 1.

Tyto oceli se svařují v popuštěném, žíhaném nebo tvrdém stavu. Teplota předehřevu se v závislosti na chemickém složení doporučuje mezi 250 až 400 °C. Po svaření by mělo ihned následovat žíhání na teplotu 600 až 700 °C. Účelem tohoto tepelného zpracování je popustit martenzit a tím snížit jeho tvrdost a pevnost. S tím souvisí i částečné zvýšení tažnosti a houževnatosti.



Obr. 1 Mikrostruktura martenzitické korozivzdorné oceli (převzato [1])

Tyto oceli lze svařovat austenitickými, ale i feritickými (martenzitickými) přídatnými svařovacími materiály.

Doporučuje se zároveň použít přídatné svařovací materiály menších průměrů, aby následující vrstva vyžihala vrstvu předchozí. Při navařování je nutné minimalizovat vnesené teplo. [1]

Další problém který může nastat, je u tohoto typu ocelí vznik fáze δ a náchylnost na mezikrystalovou korozi (MKK).

2.2 Feritické

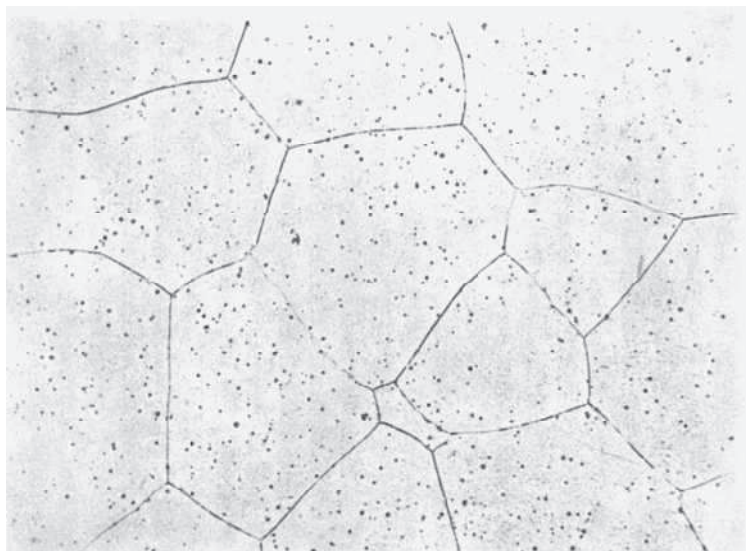
Obsahují 11,5 až 30 % chromu. Díky této konstituci nezasahují do oblasti austenitu a pokrývají pouze oblast čistého feritu. Zpracovávají obvykle žháním na teplotě 760-830°C. Uplatňuje se u nich např. žháním na odstranění pnutí po svařování anebo po deformaci za studena. Při delších výdržích nad teplotou 1000°C dochází u nich k hrubnutí feritického zrna a ke zkřehnutí matrice. [2]

Mají velmi dobrou korozivzdornost, vysokou žáruvzdornost (závisí na obsahu chromu) až do teploty 950 až 1100°C. Dobrá odolnost proti korozi pod napětím v prostředí chloridových iontů, proti bodové a štěrbinové korozi.

Nižší úroveň vrubové houževnatosti při normální teplotě. Jsou náchylné k přehřátí a ke vzniku hrubých feritických zrn (hranice zrn nic nedrží). V procesu svařování je nutno použít předehřev před svařením a dohřev po svaření, aby se zabránilo vzniku pnutí a s ním spojenému vzniku trhlin ve svaru. [2]

Dalším negativem těchto ocelí je vznik intermetalické fáze σ a zkřehnutí po žhání při teplotě 475°C, tzv. křehkost 475, je spojena se vznikem tvrdé fáze Cr_2N s jehlicovitou morfologií, která podporuje zpevnění matrice na úkor houževnatosti. Proto je vhodné, aby obsah N v oceli byl nižší. Eliminace negativního vlivu Cr_2N lze dosáhnout přísadou Ti, který má silnou vazbu na N i C a snižuje tedy aktivitu obou prvků. [3]

Pro svařování se používají přídatné materiály stejného chemického složení nebo austenitické přídatné svařovací materiály.

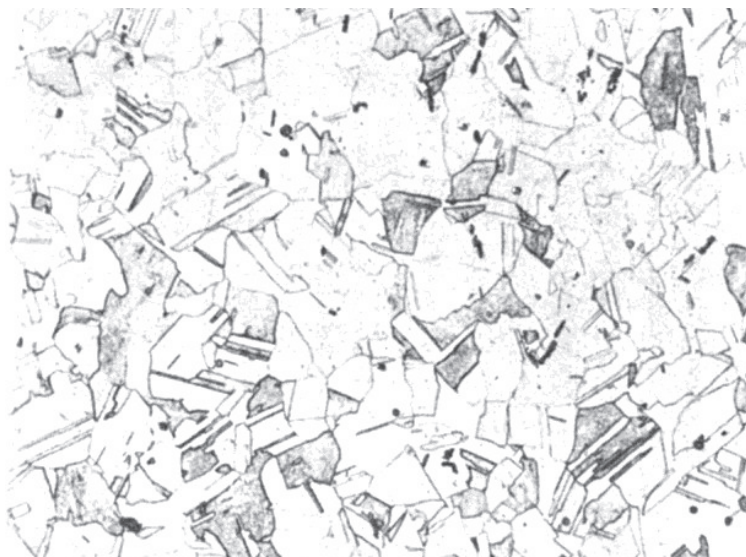


Obr. 2 Vzhled mikrostruktury feritické antikorozi oceli (převzato [2])

2.3 Austenitické

Austenitické oceli krystalizují v kubické plošně středěné mřížce. Korozní odolnost je vyšší než u martenzitických a feritických ocelí, jsou paramagnetické a náchylné ke zcitlivění, které je spojováno s přednostní precipitací karbidů typu $M_{23}C_6$, např. $(FeCr)_{23}C_6$ na hranicích austenitických zrn. Vznikem těchto hrubých karbidů dochází v jejich těsné blízkosti k ochuzení austenitické matrice o chrom, který může i podkročit kritickou hodnotu zaručující antikorozi (tj. 12 % Cr) a v této ochuzené zóně pak začíná korozní napadení austenitické matrice. Viz obrázek 3. [1]

Náchylnost ke zcitlivění je také dána nižší rozpustností uhlíku v austenitických nerezavějících ocelích, proto jsou tyto oceli stabilizovány přísadou Ti, Nb, Ta, nebo je u nich snížen obsah uhlíku pod 0,03%. Další zvyšování korozivzdornosti se zajišťuje dolegováním 2 až 4,5% molybdenu. Dolegování austenitických ocelí je však omezeno, neboť feritotvorné prvky Cr, Mo, Ti, Nb, Ta a další snižují stabilitu austenitu. Z něho mohou precipitovat intermediární fáze sigma, které způsobují nejen křehkost, ale i pokles korozivzdornosti. Náchylnost ke zcitlivění dále narůstá, jsou-li tyto oceli žhánuty v teplotním intervalu 480 až 850 °C. [3]



Obr. 3 Vzhled mikrostruktury austenitické nerezavějící oceli po rozpouštěcím žíhání (převzato [2])

2.4 Austeniticko – feritické

Tento typ ocelí je charakterizován 30 až 50 % austenitické matrice, zbytek podílu vždy připadá na feritickou. Tento typ ocelí se také často označuje jako oceli duplexní.

Převládající podíl té či oné matrice také rozhoduje o finálních vlastnostech daného typu ocelí. Podíl feritické struktury je závislý na chemickém složení a způsobu tepelného zpracování. Slitinové prvky nejsou mezi oběma fázemi rozděleny rovnoměrně. Austenitotvorné prvky se soustřeďují více v austenitu a naopak. Hodnota rozdělovacího koeficientu je závislá na chemické konstituci a teplotě žíhání. [2]

Tyto oceli vykazují vyšší pevnostní charakteristiky než austenitické oceli, jejich korozní odolnost je na úrovni austenitických ocelí, tyto oceli jsou velmi dobře svařitelné. Jejich náchylnost ke zcitlivění je nižší než v případě austenitických korozivzdorných ocelí. Mají dobrou odolnost protikoroznímu praskání pod napětím v roztocích chloridů.

Duplexní oceli mají vysokou náchylnost k vývinu křehkosti po žíhání při teplotě 475°C. Fáze σ se vyskytuje v duplexních ocelích mnohem dříve než u ocelí ryze austenitických, většinou již při ohřevu. Tyto oceli mají výraznou přechodovou oblast s teplotní závislosti na vrubové houževnatosti se zvyšujícím se podílem feritu, náchylnost na zcitlivění, zejména v teplotním intervalu 500 až 700°C. Tuto náchylnost lze snížit volbou nižší teploty rozpouštěcího žíhání než 1100°C, a to na 950°C. [4]

3 Svařitelnost austenitických ocelí

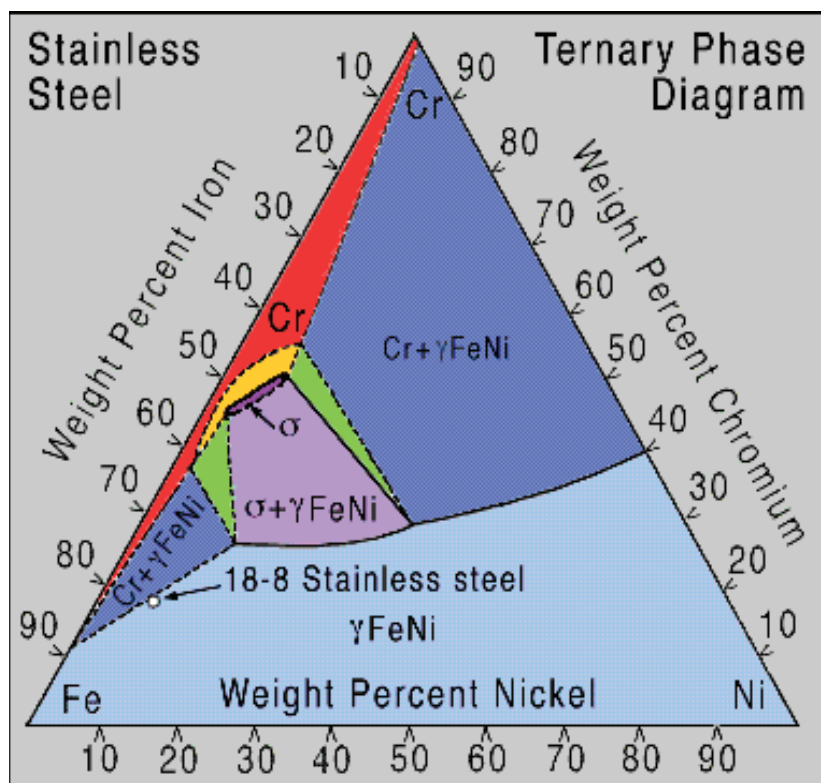
Oceli austenitické mají asi o 50% větší tepelnou roztažnost a asi o 30% nižší tepelnou vodivost než oceli feritické. Při svařování těchto ocelí se to projeví vznikem větších deformací a napětí v porovnání z feritickými oceli.

Svařitelnost austenitických ocelí, ovlivňují tři hlavní faktory

- Zkřehnutí σ -fáze
- Náchylnost k tvorbě teplých trhlin
- Precipitace karbidů chromu, jejímž důsledkem je mezikrystalová koroze

3.1 Vznik σ -fáze

Fáze σ je tvrdá, křehká intermetalická sloučenina, která je příčinou zkřehnutí austenitických ocelí. Může vzniknout ve svarovém spoji v rozmezí teplot 500 – 820°C. Při teplotě 600°C se fáze σ vyskytuje společně s fází α v rozmezí obsahu chromu 26 až 41 hm. %, oblast čisté fáze σ v rozmezí 41 až 50 hm. % Cr a oblast $\sigma + \alpha$ od 50 do 71 hm. % Cr. Fáze σ je stabilní do teploty 820°C. Při teplotě 825°C se tato fáze přemění na fází α . [5]



Obr. 4 Ternární diagram Fe-Ni-Cr (převzato [5])

Faktory podporují vznik σ fáze:

- Karbidotvorné prvky (Ti, Zr, Nb, Ta) zabrání vazbě chrómu na karbidy a tak se posunuje obsah chrómu k vyšším obsahům.
- Feritotvorné prvky (Si, Al, Ti, Mo, Nb), které vyvolají vznik chrómem bohatší fáze α a usnadní přeměnu ve fázi σ .
- Heterogenita taveb, lokální obohacení fáze α chrómem.
- Stupeň jemnosti struktury. U jemnozrnných struktur fáze σ precipituje na hranicích zrn v nesouvislých útvarech (velký povrch zrn), v hrubozrnné struktuře fáze σ migruje velmi snadno k hranicím zrn a velmi snadno se rozloží na jejich povrchu (malý povrch zrn), čímž vznikne mezi krystalová křehkost.
- Místní přesycení chrómem při rychlém ochlazení.
- Intenzivním tvářením za studena.
- Vliv teploty ohřevu v kritické oblasti, která umožní zvýšení rychlosti difuze a tím se zvýší množství vyloučené fáze σ .
- Únava za tepla. [6]

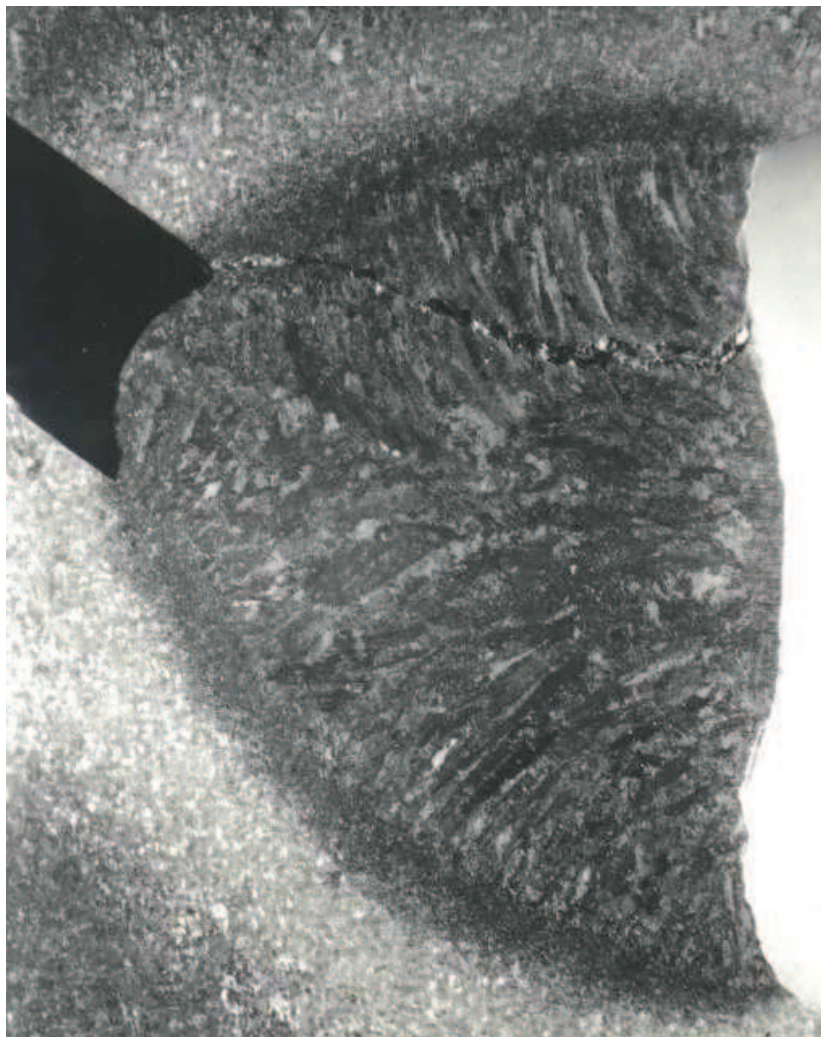
σ – fáze se projeví zejména při vyšších obsazích chrómu více než 10 hm. %.

Austenitické oceli se svařují přídavnými materiály se stejným, nebo podobným chemickým složením. Rozhodující je zde požadovaný obsah δ -feritu ve svarovém kovu. Je možné použít téměř všech známých technologií svařování, které zajistí dokonalou ochranu svarového kovu. Svařujeme je bez předehřevu, protože je nelze zakalit a nejsou náchylné na vznik studených trhlin (vysoká rozpustnost vodíku). Navíc by předehřev mohl nepříznivě ovlivnit korozní odolnost svarového spoje. S ohledem na náchylnost k tvorbě teplých trhlin limitujeme obvykle tepelný příkon do svaru na maximální hodnotu 15 kJ.cm^{-1} a teplotu interpass na max. 150°C . Snížený tepelný příkon snižuje rovněž nebezpečí růstu zrn v pásmu přehřátí TOO. Svarové spoje korozivzdorných austenitických ocelí se obvykle tepelně neupravují. [7]

3.2 Tepelně krystalizační trhliny

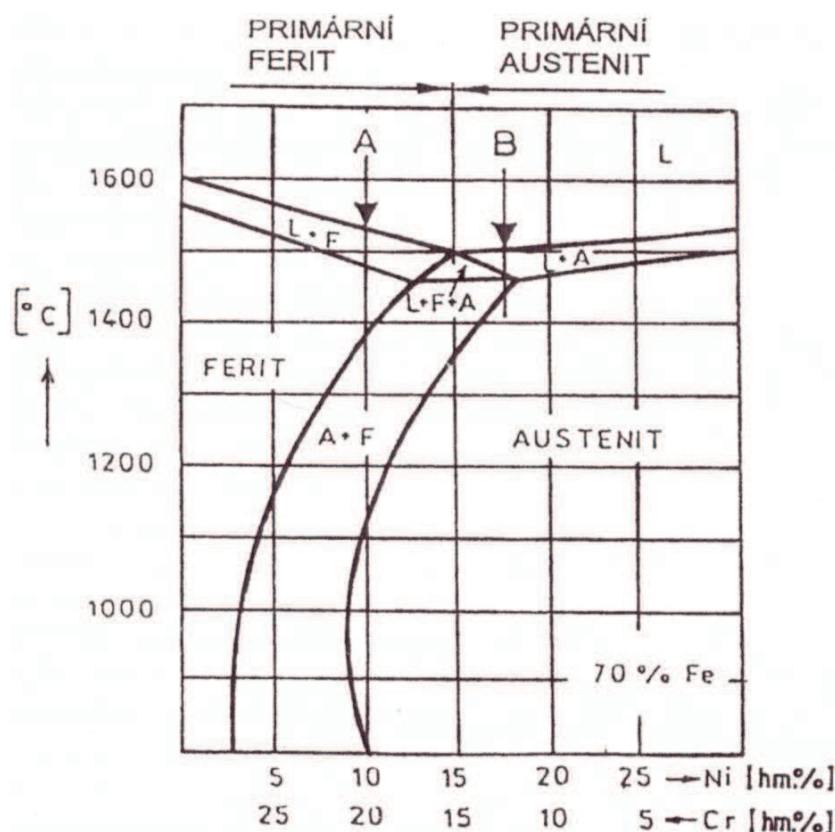
Tepelně krystalizační trhliny vznikají pouze ve svarovém kovu, likvací a polygonizační trhliny mohou vznikat jak ve svarovém kovu, tak i v TOO. Obrázek 5. Příčinou vzniku teplých trhlin jsou prvky jako S, P, Si, Nb, které buď při tuhnutí snižují plasticitu kovu tuhnoucího mezidendritických prostorách, nebo vytvářejí se železem a niklem nízkotavitelná eutektika, která výrazně snižují technologickou pevnost hranic zrn. Obsah síry lze snížit

vazbou na mangan za vzniku MnS, který přechází do strusky. Vliv fosforu je možné snížit pouze využitím jeho velké rozpustnosti v δ -feritu. Rozpustnost fosforu v δ -feritu je při teplotách pod teplotou solidu asi desetkrát vyšší než v austenitu. Obsah křemíku limitujeme ve svarových kovech na max. 0,5hm. %, doporučený limit je však pouze 0,3 hm. %. Rovněž množství titanu a niobu omezujeme pouze na obsahy nutné pro stabilizaci oceli.



Obr. 5 Tepelná trhlina (převzato [6])

Rozhodujícím faktorem pro snížení náchylnosti austenitických ocelí k tvorbě teplých trhlin je obsah δ -feritu ve struktuře. Ve svarových kovech se vyžaduje při teplotě okolí obsah 2 až 6 hm. % δ -feritu, v základním materiálu cca 3 hm. % obsahu δ -feritu. hm. %, vyšší obsahy vedou ke snížení antikoročních vlastností oceli a podporují vznik σ -fáze. Je nutné si ovšem uvědomit, že poměrně malé vyžadované obsahy δ -feritu při pokojové teplotě odpovídají asi desetinásobku obsahu δ -feritu vznikajícím při krystalizaci obrázek 6. [8]



Obr. 6 Pseudobinární rovnovážný diagram Cr-Ni pro obsah 70 hm. % Fe ve slitině (převzato [4])

S klesající teplotou se rozpustnost Ni v δ -feritu snižuje a δ -ferit transformuje na austenit. Obsah δ -feritu, který při teplotách vzniku teplých trhlin eliminuje vliv fosforu je tedy 10x větší než při pokojové teplotě. Obsah δ -feritu ve struktuře při pokojové teplotě je možné určit metalograficky (plošně), nebo magnetometricky (objemově). V současné době se dává přednost magnetometrickým metodám, které vedou k používání „Feritového čísla“ – FN, které odpovídá objemovému podílu δ -feritu ve struktuře. Pro odhady podílu δ -feritu ve struktuře Cr-Ni austenitických ocelí v závislosti na jejich chemickém složení se používají konstituční diagramy Schaefflerův, De longův a jiné modifikované diagramy [8]

3.3 Koroze u svarů

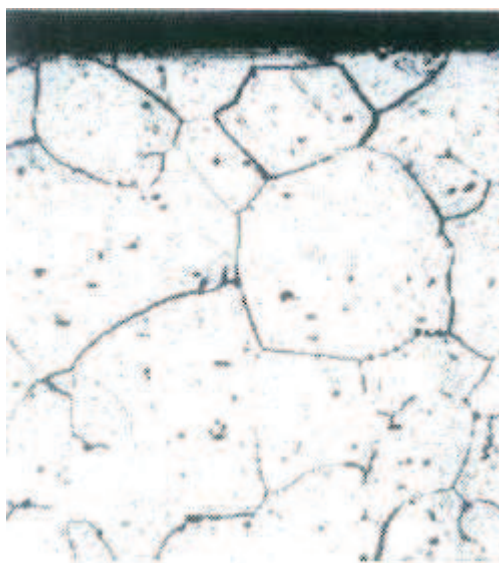
Od svarového spoje korozivzdorné oceli musíme žádat, aby celková rovnoměrná koroze projevující se pouhým úbytkem tloušťky plechu odolávala stejně jako ocel, jež byla svařována. To je zabezpečeno zpravidla tím, že svarový kov má stejné chemické složení se základním materiálem. Podle rozsahu poškození rozeznáváme, tzv. korozi celkovou (plošnou), která probíhá po celém povrchu vystaveném koroznímu prostředí víceméně rovnoměrně a korozi nerovnoměrnou - místní (lokalizovanou), která probíhá výrazně

intenzivněji pouze v některých částech exponovaného povrchu kovu, zatímco na ostatním povrchu je koroze přijatelná. Svarový spoj chromnikové austenitické korozivzdorné oceli může být někdy ohrožen ještě jinými druhy koroze, než je koroze celková. Jsou to koroze mezikrystalová, koroze nožová a korozní praskání. [9]

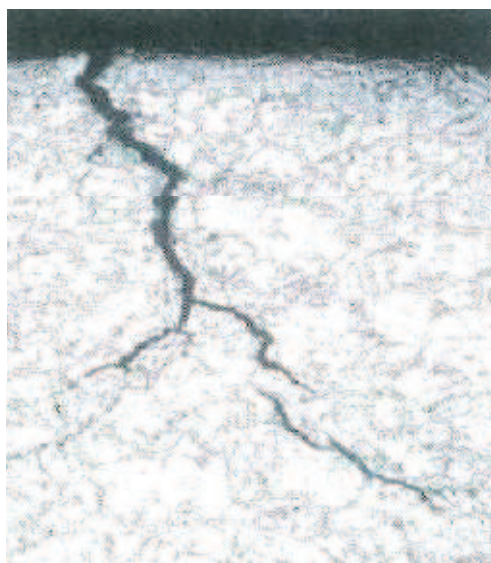
3.3.1 Mezikrystalová koroze korozivzdorných ocelí

Mezikrystalová koroze (MMK) u korozivzdorných ocelí může nastat v pásmu zcitlivění, které leží v rozmezí teplot 425 až 815°C. Obrázek 10. Vliv uhlíku na vznik mezikrystalové koroze se projeví od 0,02 hm. % jeho obsahu. Názory na vznik mezikrystalové koroze jsou následující:

- Teorie ochuzení, tj. změnou chemického složení tuhého roztoku na rozhraní zrn v okolí precipitátů.
- Teorie pnutí, tj. energetickými rozdíly v místech vylučování sekundární fáze.
- Teorie článků, tj. rozpouštěním rozhraní zrn následkem vzniku místních článků. [10]



Obr. 7 Mezikrystalová koroze v tepelně ovlivněné oblasti (převzato [11])



Obr. 8 Korozní praskání ve spoji (převzato [11])

Teorie ochuzení vysvětluje mezikrystalovou korozi snížením obsahu chromu v okolí vylučujících se karbidů a nitridů chromu. Difuze uhlíku a dusíku (intersticiálně rozpuštěných v tuhém roztoku) k hranicím zrn probíhá mnohem rychleji než difuze chromu. Proto uhlík (příp. dusík) potřebný k tvorbě karbidů (nebo nitridů) difunduje na rozhraní zrn i z vnitřku zrn, ale potřebný chrom prochází v prvních stádiích jen z okrajů austenitických zrn. Vyloučením karbidů $(Cr,Fe)_{23}C_6$ a $(Cr,Fe)_7C_3$ klesne obsah chromu v povrchové vrstvě na

hranicích zrn tak, že tato vrstva přestává být schopna pasivace a podléhá rychlé korozi. Tzn., že náchylnost k mezikrystalové korozi je nutno přičíst prostorům ochuzených o chrom, které se nachází mezi částicemi precipitátů, kde klesl obsah chromu pod 12 hm. % (teoretická hranice). [3]

Podle teorie pnutí vznikají velká vnitřní pnutí v místech, kde se začíná vylučovat a postupně roste druhá fáze. Tím vzniknou ve struktuře oceli značné energetické rozdíly, které se projeví nedokonalou pasivací hranic zrn.

Teorie mikročlánků uvádí, že většinou ušlechtilější karbid (nitrid) působí jako katoda a okolní méně ušlechtilý kov jako anoda. Na hranici karbid-základní kov se předpokládá článek, v němž okolí karbidů (nitridů) značně koroduje a to i tehdy, je-li ocel podrobena rozpouštějícímu žihání.

Z uvedeného je zřejmé, že všechny teorie uvažují jako základní příčinu vzniku MKK precipitaci karbidů a nitridů chromu.

Zvýšení odolnosti proti mezikrystalové korozi je možné potlačením vzniku precipitace karbidů chromu, která závisí na řadě činitelů, které lze rozdělit do čtyř skupin:

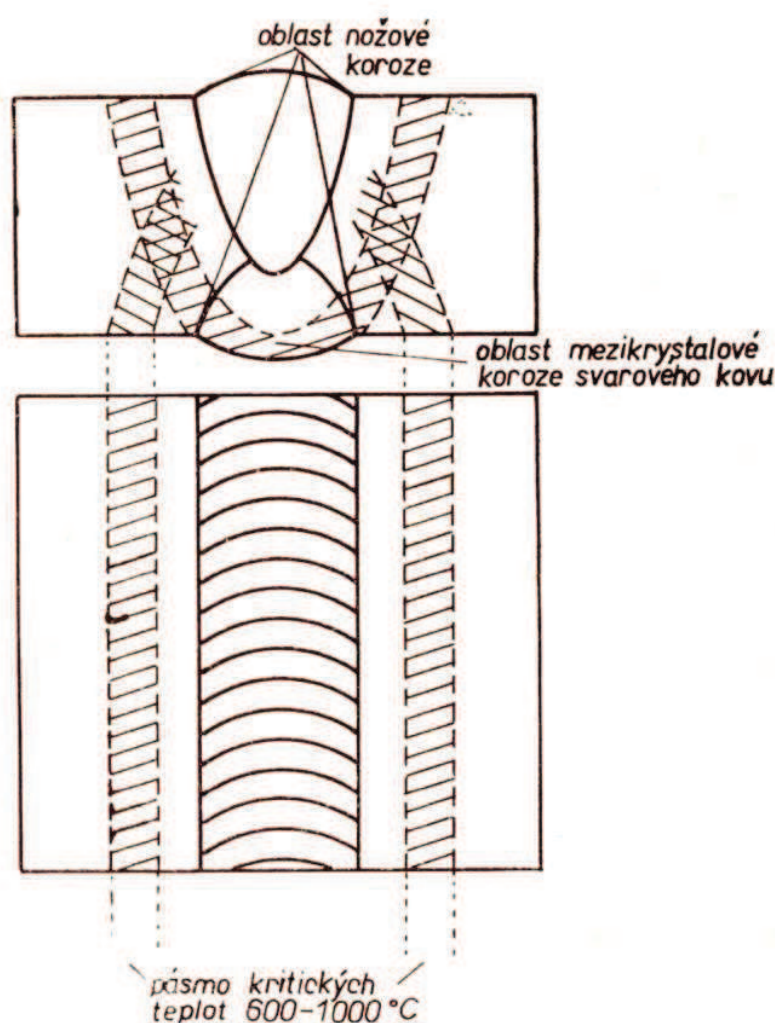
- Chemické složení oceli
- Doba setrvání v oblasti kritických teplot
- Stabilizace oceli
- Tepelné a mechanické zpracování [10]

3.3.1.1 Nožová koroze

U korozivzdorných ocelí dochází často k mezikrystalové korozi ve svarových spojích a jejich okolí a setkáváme se s ní i u slitin neželezných kovů. Jestliže je u korozivzdorných ocelí citlivost hranic zrn zapříčiněna ochuzením o chrom ohřevem v kritické oblasti teplot, nelze podobný vliv zaznamenat v případě železa v hliníku, jehož rozpustnost je natolik nízká, že nevyvolává segregaci na hranicích zrn. Proti vzniku mezikrystalové koroze korozivzdorných ocelí je možná také ochrana tzv. stabilizací (legováním titanu nebo niobu protože mají větší afinitu k uhlíku než chrom). Stabilizační legura se přidává v závislosti na obsahu uhlíku, minimálně čtyřnásobné množství titanu k uhlíku. Užívání stabilizovaných ocelí je ze současného hlediska způsob, který přináší problémy.

Přídavek stabilizačního prvku, omezuje použití oceli v silněji oxidačních prostředích a ocel provází nebezpečí nožové koroze. Vzhledově toto napadení připomíná zářez nožem. Tato náchylnost vzniká, pokud je stabilizovaná ocel při svařování přehřátá nad 1250 °C, karbid titanu se rozpustí a při rychlém ochlazení nedojde k jeho opětovné precipitaci. Vzhledem k tomu, že oblast teplot precipitace TiC je výše než pro karbidy chromu dojde při opakovaném ohřevu oceli (při svařování) k precipitaci Cr_{23}C_6 , a tedy zcitlivění stabilizované oceli. [12]

Nožovou korozi můžeme tedy brát jako jakýsi druh mezikrystalické koroze je vidět na obrázku 9.



Obr. 9 Oblasti mezikrystalové koroze ve svarovém spoji austenitické korozivzdorné oceli (převzato [3])

Koroze se v této části svarového spoje vyvíjí kupodivu velmi rychle a v mnoha případech vede k předčasnému vyřazení drahých součástí.

Nožová koroze v souvislosti s dvojitým tepelným ovlivněním (přehřátím a zcitlivěním) se objeví především tehdy, má-li základní kov více než 0,1% uhlíku, obsah niklu na horní hranici a obsah chromu na spodní hranici dané značky oceli. Také čím hrubší je zrna u zóny natavení, tím častěji se objevuje nožová koroze, i když vliv velikosti zrna na náchylnost ocelí k mezikrystalové korozi ve standardním roztoku není příliš výrazný. [1]

V praxi jsou známi případy, že vypočtená rychlost tohoto typu koroze dosahuje až 2 km za rok. To svědčí o tom, že nožová koroze je jedním z nejnebezpečnějších druhů korozního rozrušení svarových spojů z korozivzdorných ocelí.



Obr. 10 Zkouška mezikrystalové koroze korozivzdorné oceli. Vzorek vlevo byl zcitlivěn při 650 °C za 1 h, po korozní expozici byly vzorky ohnuty (převzato [12])

Přitom vyvolání citlivosti svarového spoje k nožové korozi je spjato jak s vlastnostmi a strukturou švu, tak i základního materiálu. Například u svarových spojů s čistě austenitickými švy je nožová koroze v základním materiálu doprovázena též zjevným rozrušením sousedícího svarového kovu. Ve svarových spojkách s austeniticko-feritickými švy nedochází obvykle ke korozi svarového spoje. [3]

Metalograficky je dokázáno, že tento druh koroze má mezikrystalový charakter a že svarové spoje s nízkým obsahem uhlíku jsou méně citlivé na tomuto rozrušení. [3] V austenitických korozivzdorných ocelích není pro naprostou většinu aplikací uhlík z důvodu

mechanických vlastností nutný, proto je také užívání ocelí s nízkým uhlíkem ($<0,03\text{C}$ hmot. %) nejlepší řešení jak odstranit nebezpečí mezikrystalové koroze. Současné rafinační postupy dovolují dostatečné snížení obsahu uhlíku, a není tedy již mnoho důvodů používat stabilizované oceli (pokud není cílem poněkud větší pevnost).

3.3.2 Chemické složení

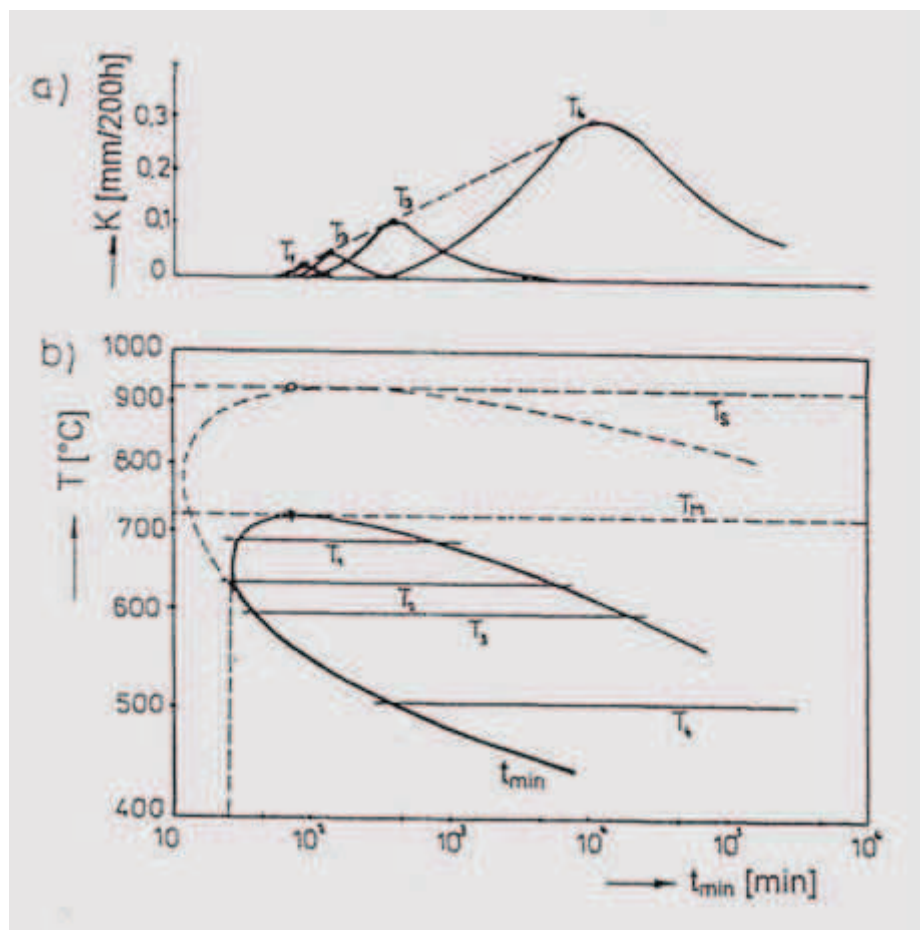
Základním problémem je působení uhlíku, který umožňuje vznik karbidů na hranicích zrn a tím způsobuje zcitlivění austenitické oceli a mezikrystalovou korozi. Tento problém lze řešit radikálním snížením obsahu uhlíku pod $0,02 \text{ hm. \%}$, kdy mezikrystalová koroze nemůže nastat. U svarů s velmi rychlými cykly lze tuto hranici zvýšit až na $0,05 \text{ hm. \%}$. Pro austenitickou ocel s obsahem niklu kolem 10 hm. \% lze psát vztah mezi nejvyššími obsahy chromu a uhlíku: [12], [13]

$$\text{Cr} \geq 80 \text{ C} + 18,8$$

Což značí pro klasickou ocel s 18 hm. \% chromu obsah uhlíku nižší než $0,015 \text{ hm. \%}$.

3.3.3 Vliv doby žíhání způsobujícího zcitlivění

Žíhání okolo teploty 650°C způsobuje nejrychlejší zcitlivění, neboť při nižší nebo vyšší teplotě žíhání byly potřebné doby mnohem delší. Rychlost mezikrystalové koroze závisí nejen na době ohřevu (izotermie procházejí maximem obrázek 11), ale též na teplotě. Z průběhu izoterm vyplývá, že během ohřevu korozivzdorné oceli probíhají ve struktuře v podstatě dva děje, z nichž jeden citlivost k mezikrystalové korozi vyvolává, druhý ji potlačuje. Oba tyto děje jsou značně závislé na teplotě (přesněji na rychlosti difuze chromu a uhlíku, příp. dusíku). Při nižší teplotě převládá první děj, při vyšší teplotě převládá druhý děj, názorně je tato skutečnost zobrazena na obrázku 11. Z tohoto Rollasonova diagramu je patrné, že od teploty T_m výše není již ocel citlivá k mezikrystalové korozi, přestože v její struktuře lze zjistit vyloučené karbidy a nitridy chromu až do teploty jejich rozpustnosti a austenitu T_s . [8]



Obr. 11 Rollasonovy křivky ohraničují oblast mezikrystalové koroze oceli, ze závislosti průniku mezikrystalové koroze na době ohřevu při teplotách T_1 až T_4 . T_M – nejvyšší teplota, při níž se začíná objevovat citlivost v mezikrystalové korozi t_{min} – minimální kritická doba setrvání na teplotě pro vyvolání citlivosti k mezikrystalové korozi. Čárkovane je vynášena oblast vylučování karbidů $M_{23}C_6$. T_s - teplota počátku rozpustnosti karbidů v austenitu (převzato [4])

3.3.4 Vliv stabilizačních prvků

Snížit obsah uhlíku pod 0,02 hm. % je obtížné. Proto se přidávají do austenitických ocelí prvky s větší afinitou k uhlíku než chrom. Jsou to titan, niob, tantal, které vytvářejí karbidy titanu TiC , karbidy niobu NbC a karbidy tantalu TaC , čímž znemožní vznik karbidů chromu $(Cr,Fe)_{23}C_6$ a $(Cr,Fe)_7C_3$ a tak zabrání ochuzení hranic zrn o chrom. Podle obsahu uhlíku musí být dodržen následující poměr, má-li dojít ke stabilizaci oceli (stabilizace korozivzdorných ocelí): [4]

$$\frac{Nb}{C} \geq 8; \quad \frac{Ti}{C} \geq 4; \quad \frac{Ta + Nb}{C} \geq 8; \quad \frac{Ta}{C} \geq 16;$$

Svarové kovy přídatných materiálů určených ke svařování austenitických ocelí by měly být legovány niobem, jako stabilizujícím prvkem. Titan vykazuje vysokou afinitu ke kyslíku, a proto v průběhu svařování více vyhořívá.

Je nutné upozornit, že stabilizace austenitických ocelí řeší problém MKK v rozmezí teplot zcitlivění 425 až 815°C. Problém MKK se však přesouvá do předeřátého pásma TOO (tepelně ovlivněná oblast), kde v oxidačních korozních prostředích může dojít ke vzniku tzv. nožové koroze. Z tohoto hlediska je použití materiálů s velmi nízkým obsahem uhlíku a dusíku výhodnější.

3.3.5 Vliv tepelného zpracování a mechanického zpracování

Tepelné zpracování svarových spojů

Austenitická ocel ohřátá nad 750°C může pomalu rozpouštět vyprecipitovaný karbid chromu a rychlým ochlazením z této teploty lze ocel udržet v austenitickém stavu. Je-li to možné, lze využít žhání nad 950°C až 1000°C, které urychlí rozpouštění karbidu rychlé ochlazení zabrání precipitaci, čímž se svarový spoj stává necitlivým k mezikrystalové korozi. V tomto případě se jedná o rozpouštěcí žhání. [4]

Dokonalé tepelné zpracování stabilizovaných ocelí je dáno především rozpouštěcím žháním. Uvolnění uhlíku z vazby karbidu chromu při teplotách rozpouštěcího žhání dovoluje jeho vazbu na karbidy stabilizačních prvků při následném stabilizačním žhání při teplotě 900°C po dostatečně dlouhou dobu. Toto žhání v žádném případě nevyvolá precipitaci karbidů chromu, ale pouze jemných karbidů titanu, nebo niobu v celém objemu zrn, tzv., že při nižších teplotách se neobjeví karbidy chromu na hranicích zrn. [4]

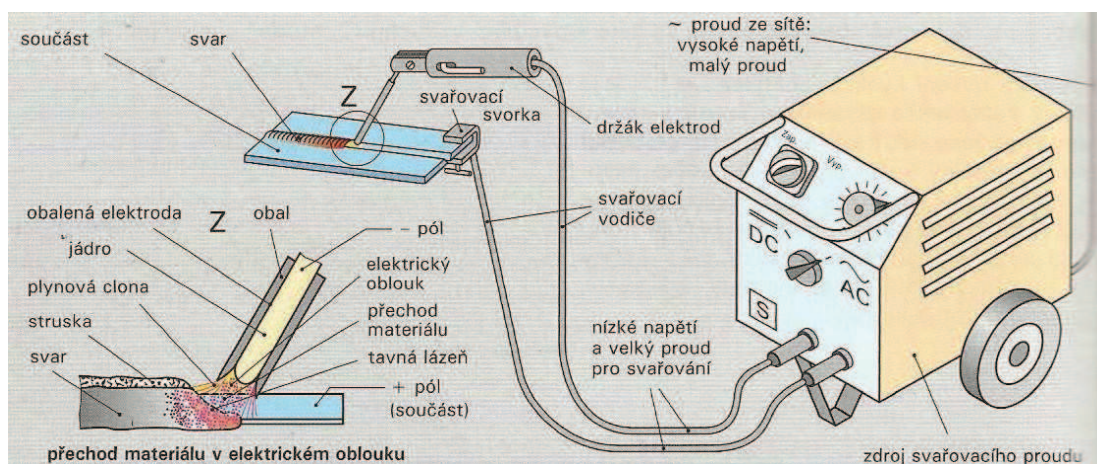
Mechanické zpracování

Bylo prokázáno, že žháním austenitické oceli na teplotě 650 až 700°C po dobu 1000 hod. nastane regenerace struktury v důsledku difuze chromu a uhlíku. Tato regenerace se urychlí předchozím tvářením za studena.

4 Metody svařování austenitických ocelí

4.1 Svařování elektrodou

Elektrickým obloukem se začalo svařovat už na konci 19. století. Teprve objev obalené elektrody na počátku 20. století přinesl široké uplatnění svařování elektrickým proudem obalenou elektrodou v průmyslové výrobě. Elektrický oblouk využívaný pro toto svařování lze charakterizovat jako elektrický výboj hořící za normální teploty a tlaku. Dalšími charakteristickými rysy této metody je že lze svařovat v podstatě všechny materiály ve všech polohách, svařovací proud je 10 až 2000 A, napětí na elektrickém oblouku 10 až 50 V. Teplota elektrického oblouku se pohybuje přibližně okolo 5000°C obrázek 12. [14]



Obr. 12 Svařování obalenou elektrodou (převzato [15])

4.1.1 Princip a charakteristika oblouku

Zdrojem tepla při obloukovém svařování obalenou elektrodou je elektrický oblouk, který hoří mezi obalenou elektrodou a svařovaným materiálem. Při tomto procesu dochází k tavení elektrody a povrchu základního materiálu. Roztavený kov elektrody a tavený struskový obal přechází sloupcem oblouku do roztavené lázně svařovaného materiálu. Po vzájemném smíšení roztavených materiálů se vytváří svar, který je chráněn struskovým příkrovem. [14]

Svařovací oblouk tvoří elektrický výboj kruhového průřezu, který prochází horkým ionizačním plynem (plazmou). Při svařování obalenou elektrodou je ionizace plynu do značné míry ovlivněna složením taveného obalu. Podmínkou pro udržení svařovacího oblouku je že,

proud musí být dostatečně velký a napětí vyšší než je ionizační napětí. V oblouku jsou na žhavé katodě uvolňovány elektrony, které procházejí sloupcem vodivé plazmy na anodu.

Elektrický oblouk má výrazné tepelné a mechanické účinky na své okolí. Obecně platí, že na kladné elektrodě se získá více tepla než na záporné, neboť katoda se ochlazuje termoemisí elektronů a anoda se jejich dopadem zahřívá. Tepelný poměr na elektrodách je závislý na materiálu elektrody prostředí, v němž oblouk hoří a na druhu elektrického proudu. Proto při obloukovém svařování obalenou elektrodou stejnosměrným proudem využíváme tohoto efektu volby polarity oblouku. Je-li na elektrodě pól mínus a na základním materiálu pól plus, hovoříme o přímé polaritě oblouku. Při opačném připojení, hovoříme o nepřímé polaritě. [16]

4.1.2 Svařovací zdroje proudu

U zdrojů pro elektrodové svařování je podstatné udržovat na konstantní hodnotě nastavený svařovací proud, nezávisle na délce oblouku. Svařovací napětí se přitom mění tak, jak odpovídá aktuální délce oblouku. Nové svařovací zdroje jsou schopné takového regulačního chování zajistit i při velkých výkyvech síťového napětí a při napájení přes velmi dlouhé kabely. [14]

Nejstaršími a nejjednoduššími svařovacími přístroji jsou transformátory bez usměrňovače s proměnným rozptylem magnetického pole, který se řídí magnetickým bočником tak, aby se udržela požadovaná hodnota svařovacího proudu. Tyto zdroje využívají ke svařování střídavý proud, nejsou použitelné pro všechny typy elektrod. Dalšími nevýhodami těchto zdrojů je vysoká váha a značné rozměry.

Tyristorové zdroje mají v sobě zabudován usměrňovač, který vytváří ze střídavého proudu usměrněný svařovací proud. Jsou to zdroje, které jsou schopné dodávat stejnosměrný proud a dají se dobře ovládat. Jejich nevýhodami je, velká prostorová náročnost i velká váha, mají malou citlivost k výkyvům síťového napětí.

Nejnovější současné zdroje jsou invertorové zdroje, které vytvářejí ze síťového napětí pulzní napětí o velmi vysoké frekvenci. Toto napětí se přivádí na svařovací transformátor, který může být, z důvodů vysoké frekvence, vyrobený v mnohem lehčím, kompaktnějším a účinnějším provedení, než v případě dříve jmenovaných koncepcí svařovacích zdrojů. Dalším novými zdroji, které mají v sobě zabudován rezonanční invertor. Podstatné u tohoto provedení je působení svařovacího transformátoru spolu se speciálním uspořádáním

kondenzátorů ve funkci zásobníků energie. Navíc přejímá tuto funkci zásobníku také transformátor, který při vybíjení získává z vlastního magnetismu elektrickou energii. Sofistikované propojení rezonance s funkcí ukládání energie vytváří cenné rezervy výkonu, které jsou v případě potřeby k dispozici pro oblouk. Ani síťové přívody delší než 100 m, stejně tak jako výkyvy síťového napětí nebo provoz s elektrocentrálou, nemají žádný negativní vliv na výsledky svařovacích operací. [14]

4.1.3 Přídavný materiál

Pro ruční svařování elektrickým obloukem se jako přídavné materiály používají obalené elektrody. Tyto se skládají z jádra a z obalu elektrody uvedené na obrázku 13. Elektrody pro obloukové ruční svařování lze obecně rozdělit podle základního materiálu do skupin.

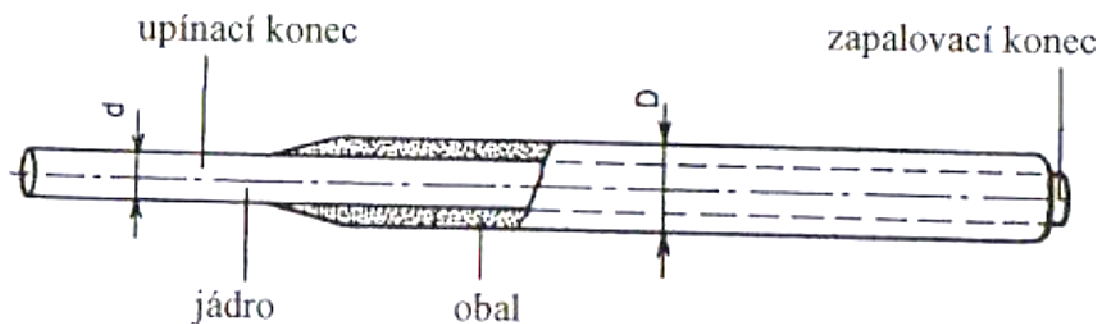
- Elektrody pro svařování nelegovaných nízkouhlíkových ocelí
- Elektrody pro svařování legovaných ocelí
- Elektrody pro svařování neželezných kovů
- Elektrody pro navařování vrstev se zvláštními vlastnostmi
- Elektrody pro speciální použití (např. pro řezání) [14]

Obal elektrody má následující funkce:

- Funkce plynotvorná (při hoření oblouku vznikají z obalu kouře a plyny, které vytvářejí druh ochranného plynu a brání přístupu vzdušného kyslíku a dusíku ke svarové lázni, což má za následek zvýšení plastických vlastností svarového kovu)
- Funkce ionizační (slouží v obalu pro usnadnění zapalování a hoření oblouku)
- Funkce metalurgická (slouží k ochraně před vypálením – propalem některých prvků při jejich průchodem el. obloukem, zejména Mn, Cr, Si, apod.)

Podle složení obalu elektrod je rozdělujeme:

Stabilizační, rutilové (R), rutil-celulózové (RC), rutil-kyselé (RA), rutil-bazické (RB), kyselé (A), bazické (B), celulózové (C). Na obrázku 13. [16]



Obr. 13 Obalená elektroda (převzato a upraveno [17])

Skladování a sušení elektrod

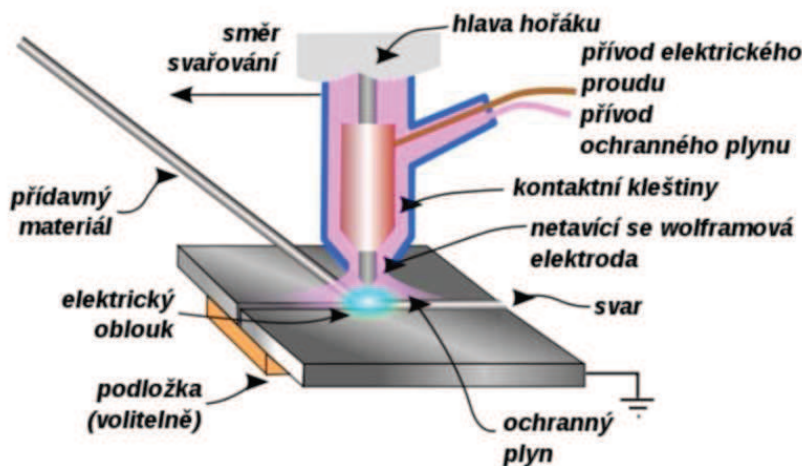
Skladování elektrod a jejich sušení je třeba věnovat velkou pozornost, protože důsledné plnění předepsaných požadavků se bezprostředně odráží na kvalitě svarového kovu. Elektrody se skladují v suchých a dobře větraných prostorách. Elektrody se skladují v původních neporušených obalech s nejnižší povolenou teplotou skladování $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$ a maximální relativní vlhkostí 50%. Navlhle elektrody je nutno vysušovat podle doporučení výrobce. Vlhkost působí na samotný proces svařování u různých obalů odlišně. Nejpronikavější vliv vlhkosti se projevuje u obalů bazických. Vlhkost obalu se vyjadřuje koncentrací vodíku ve svarovém kovu cm^3 ve 100g svarového kovu. [14]

Svařování obalenými elektrodami má především široké uplatnění v kusové a řemeslné výrobě, při opravách a rekonstrukcích součástí. Předností tohoto způsobu svařování je, že umožňuje zhotovování tupých a koutových svarů ve všech polohách, ale i spojování široké škály materiálů v dílenských a montážních podmínkách. Svarové plochy se připravují podle potřeb konstrukce a technologie. Doporučené konkrétní tvary svarových ploch, v závislosti na geometrii svarů a svařovaných tloušťek jsou uvedeny v normě. [14]

4.2 Svařování metodou TIG

Obloukové svařování wolframovou elektrodou v inertním plynu se uplatňuje v současné době ve všech oborech svařovaných konstrukcí a technických zařízení. Jeho podíl využití se neustále zvyšuje, neboť proti jiným technologiím svařování má své výhody, svarová lázeň je chráněna proti nepříznivým účinkům okolní atmosféry, zlepšení hygieny prostředí, možnost svařovat ve všech pozicích, možnost automatizace a robotizace svařování a tím i větší produktivita. Tato metoda se s výhodou používá při svařování neželezných kovů,

korozivzdorných a jiných vysoce legovaných, nízkolegovaných i nelegovaných ocelí, a to jak pro automatické svařování nejnáročnějších svarů v jaderné energetice, letecké a kosmické technice, tak pro automatové i ruční svařování v malosériové výrobě a při montážních pracích. [18]



Obr. 14 Popis svařování pomocí metody TIG (převzato a upraveno [11])

4.2.1 Princip metody TIG

Princip obloukového svařování netavící se elektrodou v inertním plynu (vidíme na obrázku 14) spočívá ve vzniku a hoření elektrického oblouku mezi netavící se wolframovou elektrodou a základním materiálem, přičemž je svarová lázeň, elektroda a nejbližší okolí svaru chráněno inertním plynem před účinky okolní atmosféry (hlavně před účinkem kyslíku a dusíku ze vzduchu). Netavící elektroda je čistě wolframová nebo s aktivující přísadou. Jako inertní plyn se používá argon, helium, případně jejich směsi. [11]

Zdrojem tepla při svařování metodou TIG je elektrický oblouk. Místním nastavením svarových ploch základního materiálu a odtavením potřebného množství přídavného materiálu se vytváří svarová lázeň, která v dalším okamžiku tuhne a vytváří tak požadovaný nerozebíratelný spoj mezi svařovaným a základním materiálem.

4.2.2 Svařovací proud

Při svařování metodou TIG se používá stejnosměrný proud konstantní velikosti nebo pulzující svařovací proud s přímou nebo nepřímou polaritou nebo střídavý proud. Stejnosměrný proud a přímá polarita se při svařování touto metodou používá nejčastěji, neboť zajišťuje stabilní oblouk a dobré vlastnosti svarových spojů i u materiálů, které vytvářejí na

povrchu vrstvu oxidů s teplotou tavení blízkou teplotě tavení základních materiálů, např. při svařování ocelí, mědi, niklu, titanu a jejich slitin. Při svařování kovů, které na povrchu vytvářejí vrstvu vysokotavitelných oxidů, se používá střídavý proud, který zabezpečuje čistící účinek svařovacího oblouku na povrchu svařovaného materiálu. [11]

Elektrický oblouk se může zapalovat dvojím způsobem, buď to dotykově anebo bezdotykově. Přednostně používáme bezdotykový způsob zapalování, neboť při dotykovém způsobu by došlo k znehodnocení wolframové elektrody a následně ke vzniku wolframových vměstků ve svarovém spoji.

4.2.3 Nejdůležitější zásady při svařování metodou TIG

- **Čistota.** Oblast svaru při svařování musí být zbavena mastnoty, oleje a ostatních nečistot. Také je nutno dbát na čistotu přídavného materiálu a čisté rukavice svářeče při svařování.
- **Přídavný materiál.** Aby se zabránilo oxidaci, musí být odtavující se konec přídavného materiálu vždy veden v plášti ochranného plynu. Přídavný materiál musí být veden pod malým úhlem vzhledem k povrchu obrobku.
- **Materiály citlivé na plyn.** Při svařování materiálů citlivých na oxidaci se musí používat sekundární ochrana plynem, aby se zabránilo zkřehnutí a oxidaci materiálu.
- **Typ a průměr wolframových elektrod.** Typ a průměr wolframových elektrod je nutno zvolit dle velikosti proudu, polarity, druhu základního materiálu a složení ochranného plynu.
- **Broušení wolframových elektrod, drsnost povrchu.** Naostření špičky elektrod by mělo probíhat v axiálním směru. Čím nepatrnější je drsnost povrchu špičky, tím klidněji hoří světelný oblouk a tím větší je jeho trvanlivost. Při broušení musí brusný kotouč běžet proti špičce elektrody, aby se zabránilo její zlomení.
- **Množství ochranného plynu, ochrana plynu.** Množství ochranného plynu je třeba přizpůsobit odpovídajícímu úkolu svařování, popř. velikosti plynové trysky. Po ukončení svařování musí proudit plyn dostatečně dlouho, aby se dostatečně chránila chladnoucí tavná lázeň a wolframové elektrody před oxidací. [18]

4.2.4 Svařování vysokolegované austenitické oceli metodou TIG

Při svařování vysokolegovaných austenitických ocelí metodou TIG je třeba brát v úvahu jejich fyzikální a metalurgické vlastnosti, z kterých pak vyplývají následující zásady svařování:

- Provést pečlivě přípravu svarových ploch s vysokou čistotou povrchu a přesné sestehování nebo upnutí svařovaných dílů.
- Používat upínací přípravky, podložky a chladicí podložky za účelem zvýšeného odvodu tepla z místa svaru.
- Používat stejnosměrný svařovací proud se zapojením na přímou polaritu – wolframová elektroda na (-) pólu svařovacího zdroje.
- Při svařování tenkých plechů a při zhotovení kořenových vrstev používat stejnosměrný pulzující proud.
- Jako ochranný plyn používat argon o vysoké čistotě min. 99,95 %, ojediněle je možné použít i směs argonu s heliem.
- Na kořen svaru použít vždy sekundární ochranu.
- Při svařování používat vždy minimální tepelný příkon – malé svařovací proudy a rychlosti, ochlazovat na teplotu $T_{\max} = 125\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- Přídavné materiály musí mít vhodné chemické složení a vysokou jakost povrchu.
- Pro svařování ocelí s větší tloušťkou používat přídavné materiály, které dávají svarový kov s malým obsahem delta feritu (3 – 5 %).
- Pro svařování stabilizovaných ocelí používat přídavné materiály stabilizované niobem.
- Používat tupý I svar bez mezery pro tloušťku materiálu $t < 1$, tupý I svar s mezerou pro tloušťku materiálu $1 < t < 4$ a tupý V svar pro $t > 4$. [11]

4.2.5 Ochranné plyny

Ochranné plyny zabezpečují při svařování metodou TIG především ochranu wolframové elektrody, tavné lázně a přilehlého základního materiálu před účinky okolní atmosféry. Zároveň mají vliv na tepelný výkon svařovacího oblouku, jeho zapálení a stabilitu po celý čas svařovacího procesu. Pro svařování vysokolegovaných ocelí se dnes používají ochranné plyny jako je argon (Ar), helium (He) nebo jejich směsi. Z hlediska kvality svarového spoje je vždy nutné zvážit, jaký ochranný plyn se pro daný základní materiál použije. [18]

4.2.6 Přídavné materiály

Přídavný materiál pro svařování v ochranném plynu se volí podle chemického složení základního materiálu, mechanických vlastností základního materiálu, požadovaných vlastností svarového spoje a typu svarového spoje. Při volbě se vždy vychází z požadavku, že svarový spoj musí mít stejné nebo lepší vlastnosti než základní materiál. Pro dynamicky namáhané

konstrukce z oceli je třeba volit přídavný materiál, který vytvoří svarový kov o jednu řadu vyšší pevnosti, než má základní materiál. [11]

4.3 Svařování metodou MIG a MAG

Svařování v ochranných plynech tavící se elektrodou, uváděné jako proces MIG/MAG, nachází ve výrobě ocelových konstrukcí a technických zařízení i při jejich opravách široké uplatnění, jako nosné technologie spojování materiálů. Svařování MAG se využívá hlavně při spojování nelegovaných ocelí a nízkouhlíkových ocelí. Svařování MIG se využívá při spojování vysokolegovaných ocelí a neželezných kovů. [19]

Proces svařování metodou MIG a MAG lze zefektivnit zavedením automatizace procesu, což má příznivý vliv na jakost svařovaných výrobků. Proto svařování MIG/MAG získalo na základě svých technických a technologických předností dominantní postavení mezi obloukovými metodami svařování. Pro svařování metodou MIG/MAG se používá zdrojů se stejnosměrným výstupem proudu. Kde kladný pól zdroje je připojen na drátovou elektrodu.

Přednost metody svařování MIG a MAG před jinými metodami obloukového svařování je:

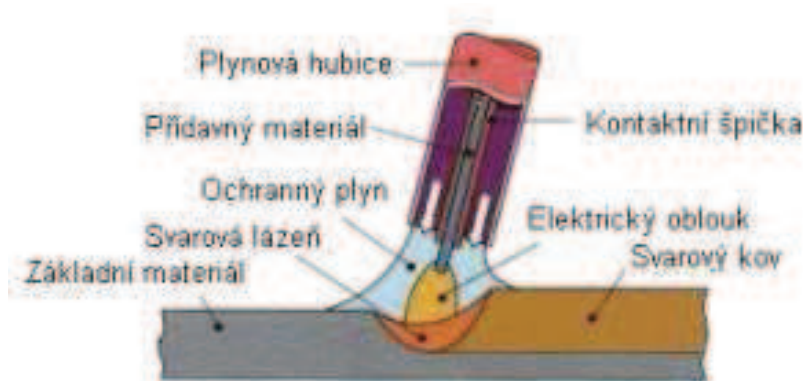
- Vysoká produktivita a hospodárnost prováděných spojů.
- Nevyžaduje se tavidel.
- Dobrá operativnost i při svařování v polohách.
- Vhodnost pro ruční, mechanizované a robotizované provádění procesu svařování.
- Možnost využití metod svařování u širokého sortimentu konstrukčních materiálů.
- Příznivé využití vlastností provedených svarových spojů.
- Malé deformace svarových spojů a svařovaných konstrukcí. [20]

4.3.1 Princip metody MIG

Zdrojem tepla pro svařování je elektrický oblouk, který hoří mezi koncem tavící se elektrody (drátu) a základním materiálem, v prostředí interního (netečného) plynu argonu (Ar), helia (He), případně Ar + H₂. Tavná svarová lázeň a její nejbližší okolí (tepelně ovlivněná oblast – TOO) je chráněna před nepříznivým vlivem okolní atmosféry (hlavně kyslíku – O₂ a dusíku – N₂), (18) uvedené na obrázku 13.

4.3.2 Princip metody MAG

Tepelný výkon pro svařování zajišťuje elektrický oblouk, který hoří mezi koncem tavicí se elektrody (drátu) a základním materiálem, v prostředí aktivního (reagujícího) plynu (oxidu uhličitého – CO_2 , $\text{Ar} + \text{CO}_2$, $\text{Ar} + \text{CO} + \text{O}_2$), uvedené na obrázku 15. Z důvodu jedno komponentního, případně více komponentního plynu se proto bude v závislosti na charakteru plynu měnit i chemické složení svarového kovu, zejména obsah C, Mn, Si prvků, a tím i jeho mechanické vlastnosti. Použitím směsných (více komponentních) plynů se podařilo podstatně zlepšit formování svaru, zvýšit stabilitu hoření oblouku a snížit rozstřík kovu. [20]



Obr. 15 Popis svařování pomocí metody MIG (převzato a upraveno [19])

4.3.3 Ochranné plyny

Ochranné plyny jsou nedílná a velmi důležitá součást metody svařování tavicí se elektrodou v ochranných plynech. Základním úkolem ochranných plynů je ochrana tavné lázně před vlivy okolní atmosféry. Přítomnost vzduchu způsobuje oxidaci a nitridaci svarového kovu, které výrazně zhoršují mechanické vlastnosti svarových spojů. Ochranné plyny svou ionizační schopností umožňují stabilní hoření elektrického oblouku a přispívají k přenosu tepelné energie do svaru. [20]

Ochranné plyny svým složením a množstvím ovlivňují celou řadu svarových charakteristik.

- Způsob přenosu svarového kovu obloukem.
- Hloubka závaru a profil svaru.
- Množství rozstříku.
- Rychlost svařování
- Stabilita elektrického oblouku.

Jako ochranné plyny pro metodu MAG (Mettal Aktiv Gass) se používá čistý plyn oxid uhličitý CO_2 , nebo v současnosti častěji používané vícesložkové směsné plyny se základem argonu – $\text{Ar} + \text{CO}_2$, $\text{Ar} + \text{O}_2$, $\text{Ar} + \text{CO}_2 + \text{O}_2$ a $\text{Ar} + \text{He} + \text{CO}_2 + \text{O}_2$. [20]

Při svařování metodou MIG (Mettal Inert Gass) se používá většinou čistý plyn argon a helium nebo jejich dvousložková směs $\text{Ar} + \text{He}$. Čistota plynů a přesnost míchání směsí jsou stanovené normou.

4.3.4 Přídavný materiál

Přídavné materiály pro MAG/MIG svařování se používají jako drátové nebo trubičkové elektrody, vhodného chemického složení a operativních svařovacích vlastností. Dodávají se navinuté na speciálních cívkách a ve vhodných obalech, které zabraňují poškození a znehodnocení.

Přídavné materiály plní při svařování tyto funkce:

- Doplnují objem svarové lázně.
- Nahrazují prvky, které se při svařování vypálily nebo jinak snížily svou koncentraci ve svaru.
- Dodávají vhodné legující prvky a dezoxidační přísady do svaru pro zlepšení užitečných vlastností.

Musejí mít vhodné chemické složení, vhodný průřez, vysokou čistotu a hladkost povrchu, přiměřenou tvrdost a tuhost i požadované rozměrové a tvarové tolerance.

Pro svařování MAG mají dráty zvýšený obsah manganu a křemíku z důvodu jejich většího propalu a silnějšího dezoxidačního účinku svarové lázně. Drátové elektrody se používají pro ruční i strojní svařování. [19]

5 Metalurgické pochody při svařování

5.1 Teplotní cyklus

Teplotní cyklus při svařování udává změnu teploty v závislosti na čase v daném místě svarového spoje a to především v tepelně ovlivněné oblasti (TOO). Velikost a charakter těchto změn je možné hodnotit podle.

- Času ohřevu na maximální teplotu, nebo rychlost ohřevu ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$).
- Nejvyšší teploty cyklu T_{\max} ($^{\circ}\text{C}$).
- Doby výdrže na dané teplotě (s).
- Rychlost ochlazování ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$).

Hodnoty uvedených parametrů závisí zejména na svarovém materiálu (na chemickém složení, na rozměrech) a na technologii svařování (způsobu, parametrech a na postupu).

Rozdělení teploty ve svařovaném materiálu je závislé zejména na zdroji tepla, rychlosti svařování a na druhu svařovaného materiálu. Hodnota maximální hustoty výkonu (Wm^{-2}) z hlediska jeho koncentrace, pro různé zdroje energie s výkonem 1kW je nejvyšší u laserového paprsku, dále následují elektronový paprsek, plazma, el. oblouk a plamen.

Efektivně využitý výkon (účinnost) při elektrostruskovém svařování je nejvyšší (až 90%, účinnost 0,9), nízké je využití při svařování TIG (66% účinnost 0,66).

Z hlediska svařování je důležitý tepelný výkon Q ($\text{kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$), počítaný podle rovnice.

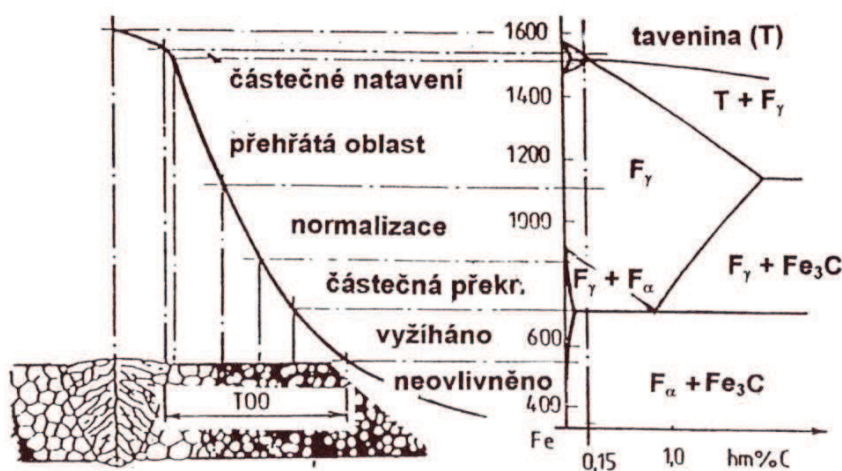
$$Q = k \cdot E = k (U \cdot I / v) \cdot 10^{-3} \quad (\text{kJ} \cdot \text{mm}^{-1})$$

kde U je napětí (V), I proud (A), v rychlost svařování ($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$), a koeficient účinnosti postupu svařování (ruční svařování 0,8) [13]

5.2 Přeměny v tepelně ovlivněné oblasti

V případě svařování kovů a slitin bez polymorfni přeměny nedochází v TOO ke změně mikrostruktury a probíhají pouze substrukturní změny a rekrytalizace, tj. růst nebo zjemnění zrn. V kovech a ve slitinách s polymorfni přeměnou (oceli) dochází v TOO k významným strukturním změnám, které mají vliv na vlastnosti svarových spojů. Při svařování nelegovaných, případně legovaných ocelí s polymorfni přeměnou můžeme podle obrázku 16. teplem ovlivněnou oblast rozdělit na charakteristická pásma:

- Oblast částečného natavení tvoří přechod z TOO do svarového kovu. U většiny ocelí se tato oblast redukuje na linii stavení (fúzní zóna), protože rozdíl mezi teplotou solidu a likvidu je minimální.
- Oblast přehřátí, tj. oblast s teplotami vysoko nad A_3 , při kterých dochází k intenzivnímu růstu zrn (teplota podle složení oceli 1100 až 1300°C).
- Oblast vyhřátá nad teplotu A_3 s úplnou transformací (normalizace).
- Oblast s neúplnou polymorfní přeměnou, tj. mezi teplotami A_1 až A_3 .
- Oblast pod teplotou A_1 , ve které probíhají změny buď v rámci tuhého roztoku F, případně substrukturní změny. Pozornost je nutné věnovat oblasti ohřáté na teplotu okolo 250°C a to z hlediska stárnutí oceli. [17]



Obr. 16 Vliv teplotního účinku svařování na strukturu svarového spoje (převzato a upraveno [17])

Šířka jednotlivých oblastí TOO je rozdílná pro různé technologie svařování a je ve velké míře závislá na svařovacích parametrech. Celkové šířky TOO se pohybují pro ruční obloukové svařování a MAG okolo 3 až 6 mm, z toho šířka přehřáté oblasti okolo 0,2mm. Pro svařování pod tavidlem je celková šířka 5 až 15mm, z toho přehřátá oblast je 0,5 mm a u elektrostruskového svařování je celková šířka TOO až 50 mm, z toho přehřátá oblast až 5 mm. Při svařování elektronovým paprskem a laserem jsou šířky velmi malé a nepřesahují 0,80 mm.

5.3 Jednovrstvé a vícevrstvé svařování

Teplotní cyklus má vliv na překrystalizační a na difúzní procesy. Jak už bylo uvedeno, charakterizuje především dobou chladnutí mezi teplotou 800 ž 500°C. Při vícevrstvěm navařování je teplotní cyklus shodný s obrázkem 16 s tím, že při vícevrstvěm svařování je tvar teplotních cyklů složitější. Princip je v tom, že po převaření první housenky druhou

housenkou je TOO od první housenky znovu teplotně zpracována, tj. oblast je vyžhána druhou housenkou. V případě navaření třetí housenky je oblast znovu žhána, což je z hlediska snížení napjatosti výhodné. Při navaření krycí housenky s převýšením můžeme tuto housenku hodnotit jako žhací, tj. po opracování povrchu převýšení housenky obdržíme svarový spoj s podstatně sníženou hladinou pnutí. Při vícevrstvě svařování dochází k žhání již navařené housenky další housenkou. Jev může řešit problematickou oblast TOO, kde funkcí žhací housenky můžeme žhat – popouštět – zákalné struktury. [9]

5.4 Typy vad, příčiny jejich vzniku a hodnocení

Vadou výrobku se obecně rozumí každá odchylka od vlastností předepsaných technickými normami, technickými podmínkami případně smluvním vzorkem. Vady výrobku mohou být zjevné, které lze zjistit při prohlídce výrobku tzv. vizuální kontrolou, nebo skryté, které můžeme zjistit nedestruktivními testy, posléze destruktivními testy. Podle ustanovení příslušných předpisů, mohou být vady přípustné, nepřípustné, opravitelné nebo neopravitelné. Vady přípustné jsou takové vady, které normy, technické podmínky nebo smluvní vzorek dovolují a jejich odstranění není nutné. Vady nepřípustné jsou takové, které neodpovídají přípustným hodnotám. Tyto vady mohou být opravitelné nebo neopravitelné.

5.5 Typy vad při svařování

Vady vznikající u všech procesů svařování se převážně týkají necelistvostí. Obrázek 17, 18 a 19. Defekty vyskytující se ve svarových spojkách a návarech můžeme rozdělit do dvou hlavních skupin. Jsou to jednak plošné vady a dále vady objemové. Do první skupiny zařazujeme vady typu trhlin, neprůvarů a studené spoje. Ve druhé skupině jsou především vady typu pórů, bublin, kovových a nekovových vměstků, ale také zápaly, vruby, nedodržení rozměru (hubený kořen, krápníky, převýšený svar, propadlý svar) a nepravidelný povrch svaru.

5.6 Příčiny vzniku vad

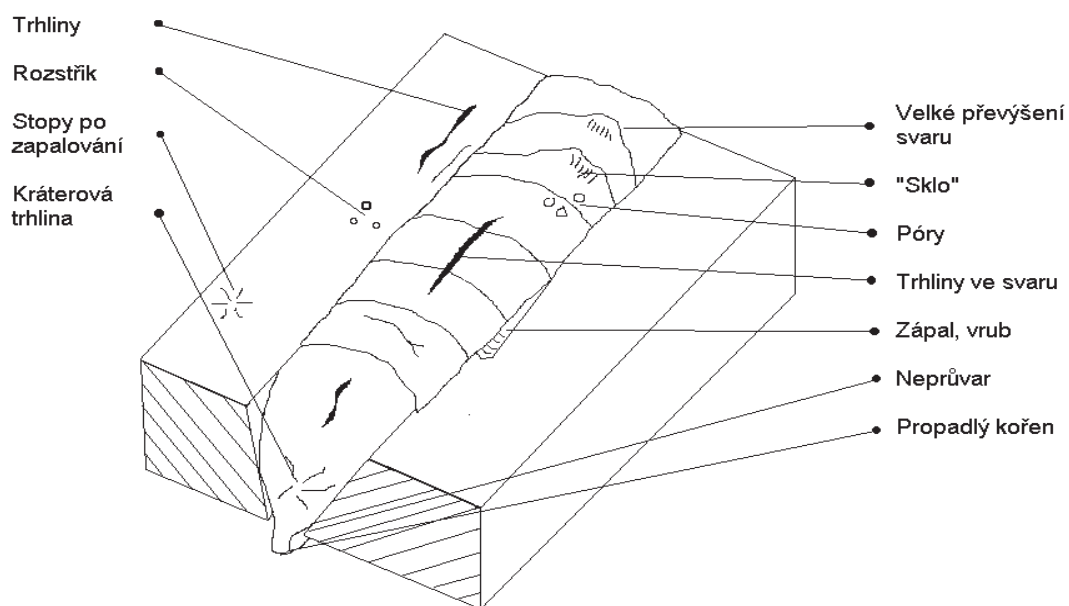
Vady typu trhlin se mohou vyskytovat jako:

- Horké trhliny.
- Studené trhliny.
- Žhací trhliny.
- Lamelární trhliny.
- Kráterové trhliny

Příčinou horkých trhlin je především chemické složení základního materiálu (vysoký uhlík, mangan a další.) případně vyšší obsah síry. Vznikají při teplotách mezi 450 až 600°C (trhliny precipitačního charakteru) nebo pod teplotou T_S – solidu (trhliny likvačního charakteru). [11]

Studené trhliny vznikají především působením difuzního vodíku, také u ocelí s vyšším obsahem uhlíku nebo ocelí legovaných. Vznikají obvykle po zakončení svařování při teplotách pod 300°C. [11]

Žíhací trhliny vznikají buď v nízkoteplotní oblasti (do 300°C) v důsledku velkého teplotního gradientu mezi povrchem a středem svarového spoje nebo v oblasti dolních žíhacích teplot (500 – 600°C) především u ocelí na bázi chromu a vanadu. [11]



Obr. 17 Vady venkovní viditelné (převzato a upraveno [21])

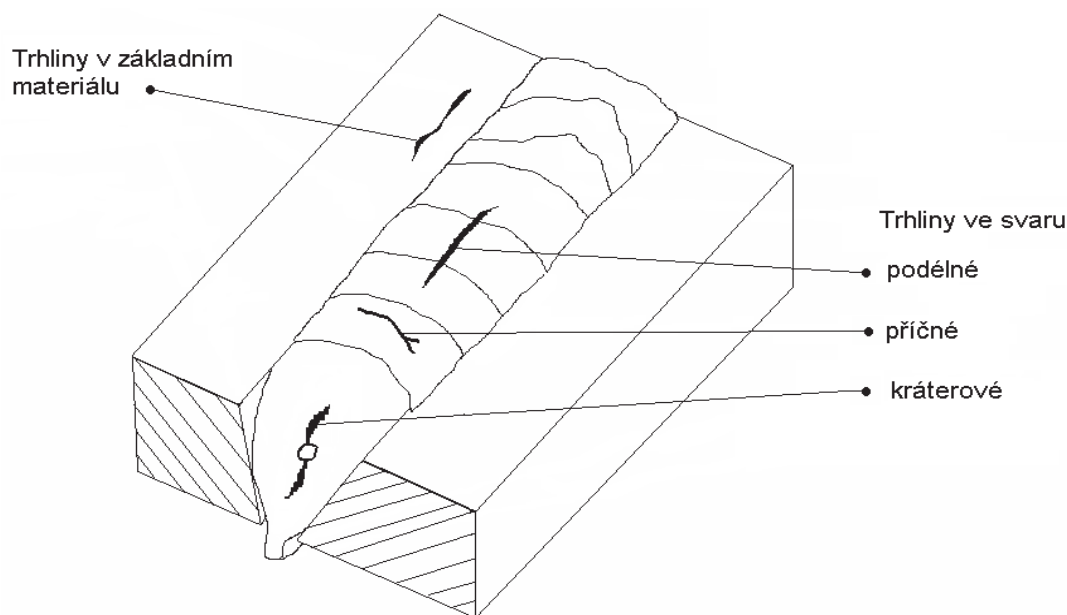
Lamelární trhliny mohou vznikat jak v základním materiálu, tak i v tepelně ovlivněné oblasti především za vysokých teplot, ale šířit se mohou i za studena. Vznikají za spolupůsobení napjatosti v místech, kde jsou u plechů rozválcovány nečistoty typu siříkových nebo lidických vměstků. [11]

Kráterové trhliny jsou specifickým druhem horkých trhlín, vznikajících při náhlém a rychlém ukončení svařování. Vznikají v dutině kráteru a jsou zapříčinovány smršťováním při tuhnutí svarového kovu. [11]

Neprůvary jsou defekty vznikající v důsledku neúplného natavení základního materiálu nebo přilehlých svarových housenek. Nejčastěji se objevují při svařování MIG/MAG při zkratovém procesu. Mezi hlavní příčiny ovšem patří především vysoká svařovací rychlost, nízký svařovací proud, nevhodná příprava svarových úkosů, předběhnutí svarové lázně, příliš vysoká housenka nebo velký průměr obalené elektrody. [19]

Studené spoje jsou zapříčiněny nedokonalým tavným spojením svarového kovu se základním materiálem nebo navařenou housenkou. Mezi hlavní příčiny patří nízký svařovací proud, nesprávné vedení elektrody, velká rychlost svařování případně nevhodně volený průměr elektrody (malý). [19]

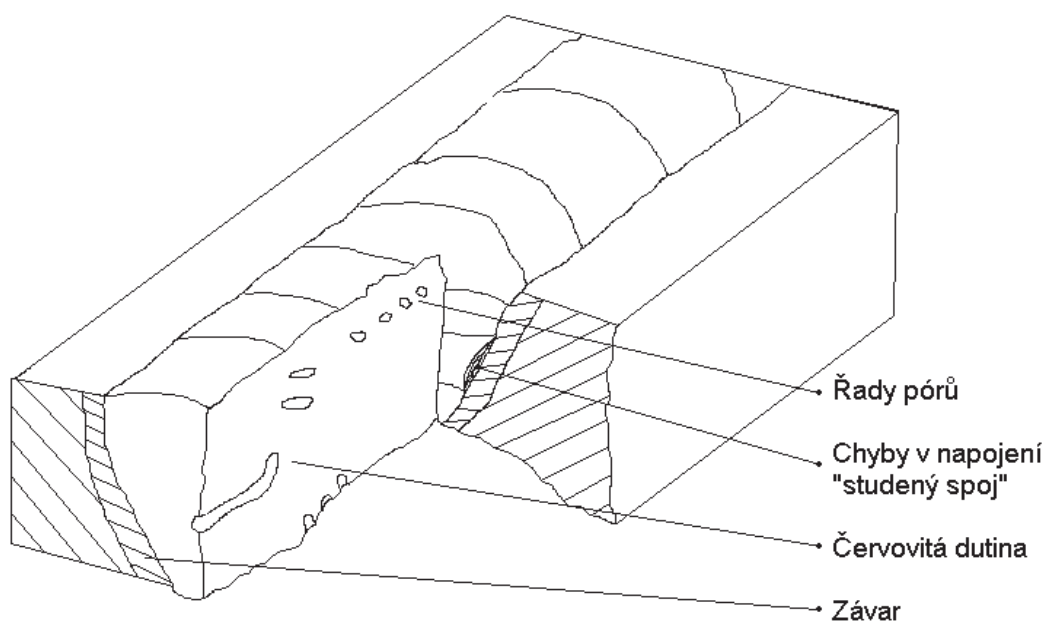
Póry a bubliny jsou objemové vady kulovitého nebo protáhlého tvaru, vyplněné plynem. Příčinou vzniku může být špatně vysušená elektroda, vlhkost v plynu, nečistoty na svarových hranách, příliš dlouhý oblouk, vysoká rychlost svařování nebo rychlé tuhnutí lázně v důsledku nízkého svařovacího proudu a vysoké rychlosti svařování. [19]



Obr. 18 Vady venkovní viditelné (převzato a upraveno [21])

Vměstky neboli inkluze mohou být různého typu. Především jsou to struskové vměstky, které vznikají především nedokonalým odstraňováním strusky mezi jednotlivými svařovacími vrstvami, když struska předbíhá oblouk nebo je špatně položená svarová housenka. Oxidické vměstky vznikají především v důsledku nedokonalého čištění povrchu. Vyskytují se především oxidů hliníku a hořčíku (mají vysoký bod tání). Kovové vměstky (především wolframové) vznikají v důsledku vysokých proudů, dotyku elektrody a tavnou lázní nebo porušením plynové ochrany. [19]

Zápaly jsou ostrá natavená prohloubení na hranicích svarové housenky a základního materiálu. Častěji se vyskytují u koutových svárů. Mezi hlavní příčiny patří příliš velký svařovací proud, dlouhý oblouk, nevhodný průměr elektrody případně její špatné vedení. [19]



Obr. 19 Vady vnitřní (převzato a upraveno [21])

5.7 Hodnocení vad

Pro hodnocení přípustnosti určitého typu vady se vychází z přístupu „vhodnosti pro daný účel“, tj. principu přípustné vady, kdy se vychází ze zkušenosti, že vada ovlivňuje nejvíce porušování křehkým lomem a únavové porušení. To se týká především nejnebezpečnějších vad, tj. trhlin. Jejich hodnocení přípustnosti vychází z teorie lomové mechaniky, jako základního nástroje posouzení vlivu těchto vad na životnost svařovaných

konstrukcí na základě předpokládaného provozního namáhání. Přípustnost vad stanovuje konstruktér a ovlivňuje technolog, který navrhuje a zajišťuje výrobu. Přípustné meze velikosti vad pro tři stupně jakosti (B, C a D) odpovídající jakosti ve výrobě jsou předmětem normy ČSN EN ISO 5817 „Svařování – Svarové spoje ocelí, niklu, titanu a jejich slitin zhotovené tavným svařováním – Určování stupňů jakosti“. Zda výrobek stanoveným kritériím jakosti a spolehlivosti vyhovuje, ověřuje za použití příslušných kontrolních metod pracovník nedestruktivní kontroly.

6 Odebírání vzorků

Reálný kov není dokonale homogenní. Proto výsledky některých zkoušek - zejména vlastnosti strukturně citlivých – jsou značně závislé na místě a způsobu odběru vzorku. Je proto třeba vzorek odebrat tak, aby žádoucím způsobem charakterizoval zkoumané vlastnosti materiálu jako celku (průměrné vlastnosti). Často je k tomu nezbytný větší počet vzorků, zachycuje-li zkouška vlastnosti jen malé oblasti materiálu. Jindy žádáme, aby vzorek zachytil vlastnosti těch částí výrobku, které jsou nejvíce exponovány z hlediska technologického zpracování nebo provozu. Posléze je cílem zkoušky zjištění průběhu (gradientu) určitých vlastností. Podle těchto hledisek se musí zvolit místo a metoda odběru zkušebních vzorků a jejich počet. Odběrem vzorku se samozřejmě nesmí ovlivnit zkoušená vlastnost (vyhřátí vzorku při odřezávání apod.). Místo odběru je definováno normami. [22] (např. EN 13445 - Netopené tlakové nádoby).

Ze vzorku se zhotoví zkušební těleso pro vlastní zkoušku. Tvar, rozměr i způsob opracování zkušebních těles je pro většinu zkoušek předepsán normou. K mechanickému zkoušení používáme zvláštní zkušební stroje a zařízení. K reprodukovatelnosti výsledků je nutno provádět zkoušky jednotným způsobem, který je předepsán normou. [22]

7 Praktická část

V roce 2013 byly na spodním víku odparky E1401, ve které se zahušťuje dusičnan amonný zjištěny dva defekty typu trhlin. Materiál spodního víka odparky je austenitická ocel 1.4306, která je vedena jako velmi dobře svařitelná prakticky všemi svařovacími procesy s výjimkou svařování plamenem. Viz obrázek 20.

Provozovatel nechal defekty, které vznikly na spodním víku aparátu E1401 odbornou firmou opravit - zavařit. Po vychladnutí a demontáži se podařilo identifikovat pouze jednu z trhlín. Ta byla zavařena. Provozovatel objednal náhradní víko a po jeho dodání provedl výměnu za nové. Cílem této práce je provést kontrolu opravného svaru, jako podklad pro podobné opravy na dalších dlouhodobě provozovaných zařízeních, která pracují s dusičnanem amonným.

7.1 Odebrané vzorky

Tlaková nádoba aparátu E1401 byla vyrobena v roce 1990, aparát byl uveden do provozu v lednu 1991. Průměr válcové nádoby je 1200mm, výška 7824mm, tloušťka starého víka je 4mm a 6mm, jelikož staré víko aparátu bylo tvořeno svařencem o různých silách stěny. Aparát pracuje při vnitřním přetlaku 7,5 baru a teplotě uvnitř 200°C. Ocel víka 1.4306 byla tedy provozně namáhaná dvacet dva let. Z vyřazeného víka byly odebrány výřezy z pláště víka s opravným svarem i výřezy mimo tuto oblast. Dále byly odebrány vzorky i z vnitřní rozrážecí desky.

7.2 Vizuální prohlídka víka

Před odebráním vzorků byla provedena vizuální kontrola víka. Tato kontrola zjistila výskyt dalších indikací zárodků trhlín a to i v oblastech bezpečně mimo tepelně ovlivněnou oblast od opravných svarů. Toto zjištění si vynutilo provést kromě posouzení svarů i hodnocení materiálu víka.

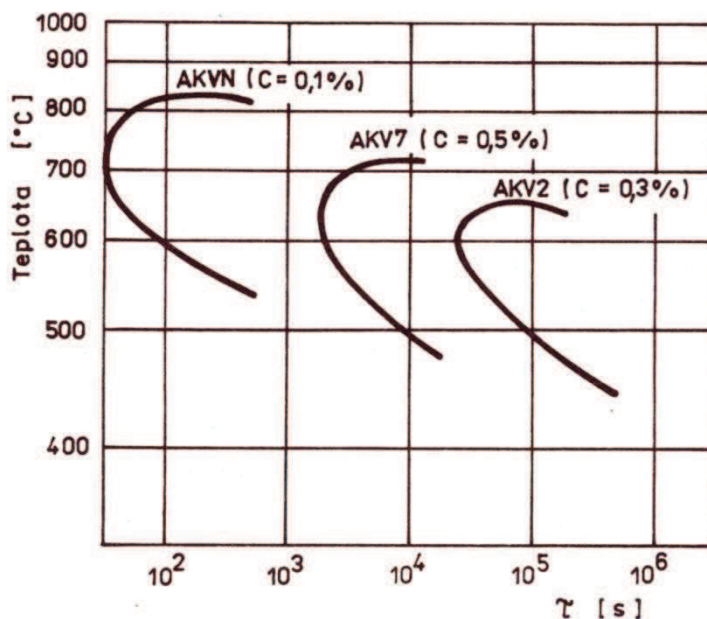
7.3 Ocel 1.4306

Jedná se o chromniklovou austenitickou nestabilizovanou nízkouhlíkovou ocel 1.4306 (X2CrNi19-11), respektive podle starého značení AISI 304L, ČSN 17 249, AKV2 atd. přejímací podmínky dle ČSN EN 10028-7 [23]. V dostupných korozních sbornících je ocel 1.4306 korozně odolná proti dusičnanu amonnému do teplot 100°C.



Obr. 20 Aparát E1401, na spodním dnu tohoto aparátu byly provedeny zkoušky.

Materiál POLDI AKV2 je vhodná pro prostředí, kde je nebezpečí vzniku mezikrystalové koroze a svařované díly není možno podrobit po provedeném svařování rozpouštěcímu žíhání. Z anorganických kyselin dobře odolává kyselině dusičné včetně koncentrované při teplotách do bodu varu. Není náchylná ani k tzv. nožové korozi, které podléhají např. oceli stabilizované titanem. [24] Možno vidět na obrázku 21.

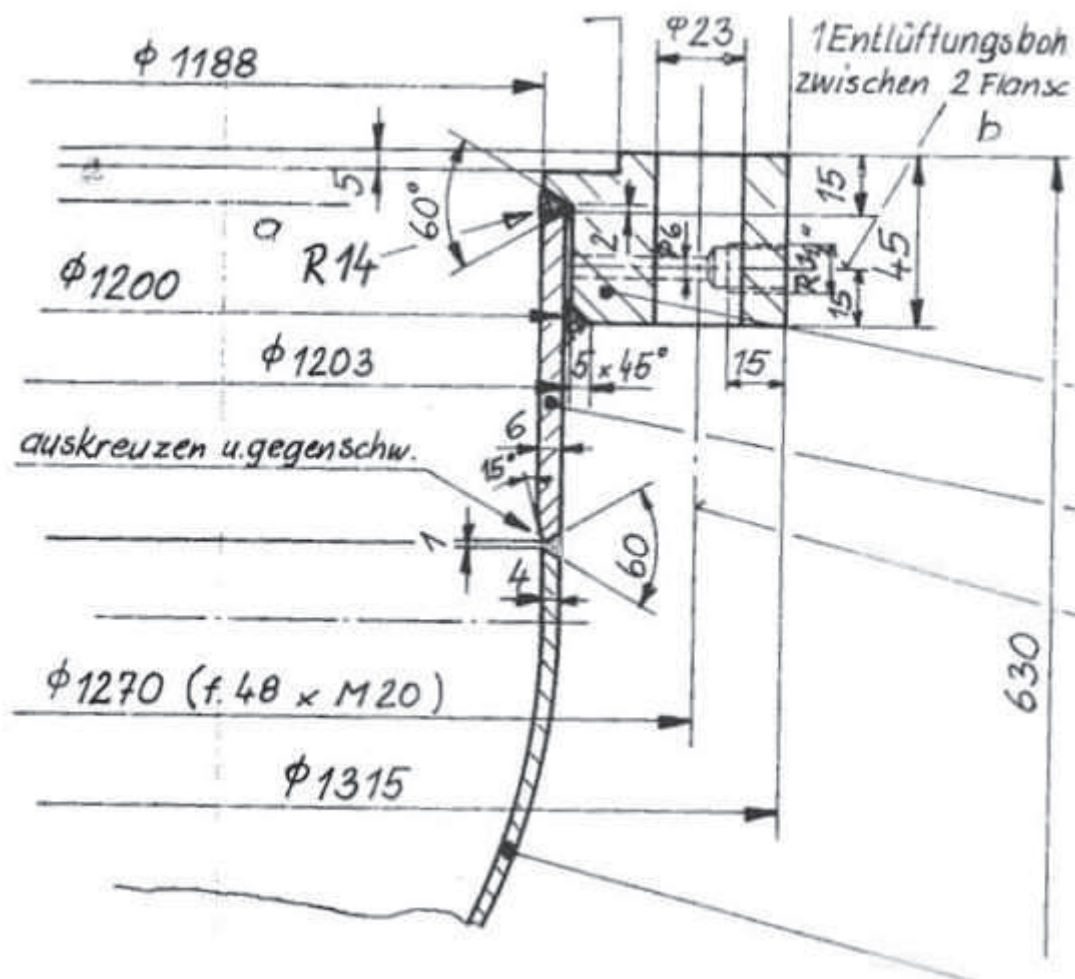


Obr. 21 C – křivky oblastí mezikrystalové koroze ve standartním roztoku $\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{CuSO}_4$ ocelí POLDI AKV2, AKV7 a POLDI AKVN. Převzato. [24]

Pro srovnání je možno vzít ocel AISI 304L, která je svými charakteristikami takřka totožným materiálem s hodnocenou ocelí 1.4306. Ocel AISI 304L je z hlediska odolnosti vůči korozi v dusičnanu amonném nad teplotou 120°C hodnocena jako ne zcela korozně odolná („Thematerialis not corrosionproof, but useful in certaincases[25].“)

Zhodnotit korozní úbytek plošnou korozi je velmi obtížné, protože výchozí tloušťku stěny nového víka v roce 1990 nikdo nezměřil a je k dispozici pouze atest materiálu, který uvádí sílu materiálu 4mm a 6mm, jelikož staré víko aparátu bylo tvořeno svařencem o různých silách stěny. V pevnostním výpočtu a rozpisce materiálu najdeme ty samé hodnoty.

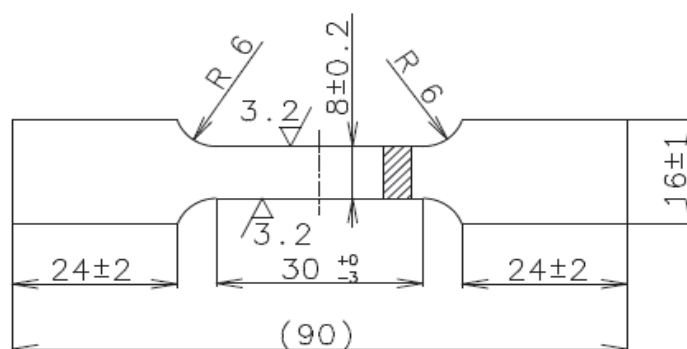
Skutečná tloušťka na odebraných vzorcích se pohybuje od 3,7 do 4,0mm je vidět na obrázku H – víka - 1. 39. Pokud budeme předpokládat, že původní tloušťka byla skutečně 4 mm, jelikož staré víko bylo tvořeno svařencem o různých tloušťkách stěny je vidět na výkrese víka obrázek 22, přičemž výřez byl proveden na této části dna, odpovídá lineární korozní rychlost hodnotám korozních sborníků pro dusičnan amonný.



Obr. 22 Výkres víka odparky, výřez výkresové dokumentace aparátu E 1401 z roku 1990.

7.4 Tahová zkouška

Z odebraných vzorků oceli, víka byly vyrobeny dvě ploché tahové tyče obrázek 23.

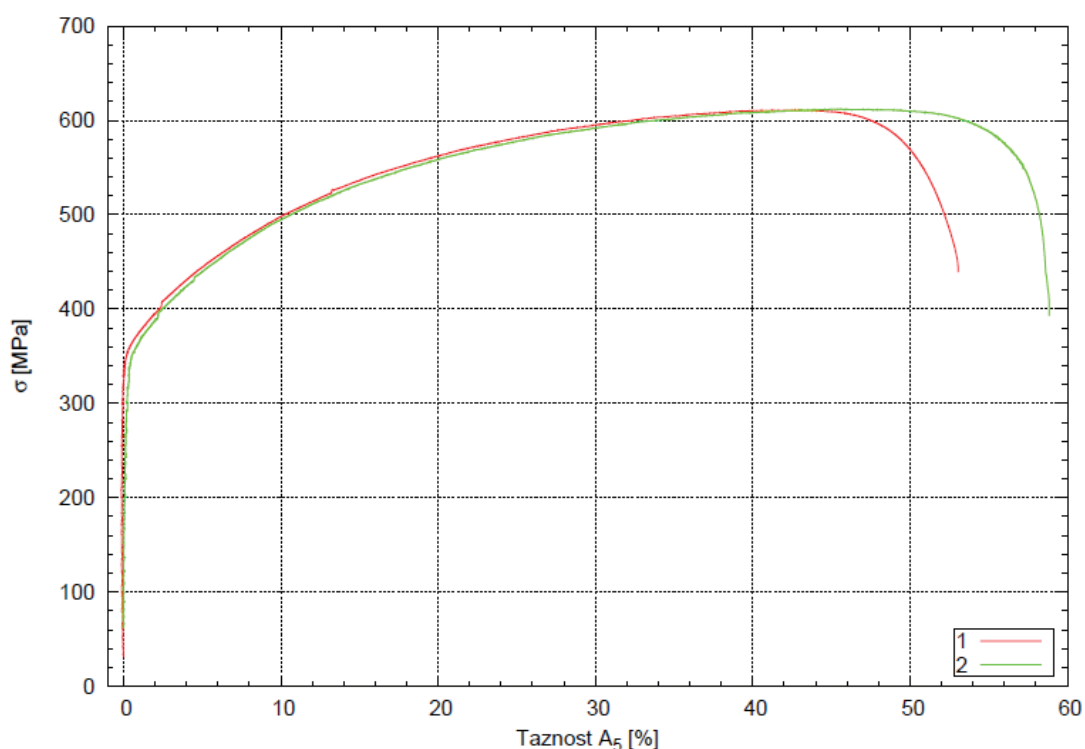


Obr. 23 Rozměry zkušebních tyčí. Experimentálně stanovené hodnoty jsou v tab. 1

Experimentálně stanovené hodnoty jsou v tabulce 1. Počáteční rychlost příčnicku 0.5 mm/min. R_m je mez pevnosti, $R_{p0.2}$ je smluvní mez kluzu, A_5 je tažnost a Z je kontrakce. Grafické vyjádření výsledku tahové zkoušky je na obrázku 24.

Tabulka 1. Výsledky zkoušky tahem při okolní teplotě 20 °C

Vzorek	Průřez [mm x mm]	R_m [MPa]	$R_{p0.2}$ [MPa]	A_5 [%]	Z [%]
1	7.82x3.97	611	354	53	70
2	7.97x3.95	611	340	58	65

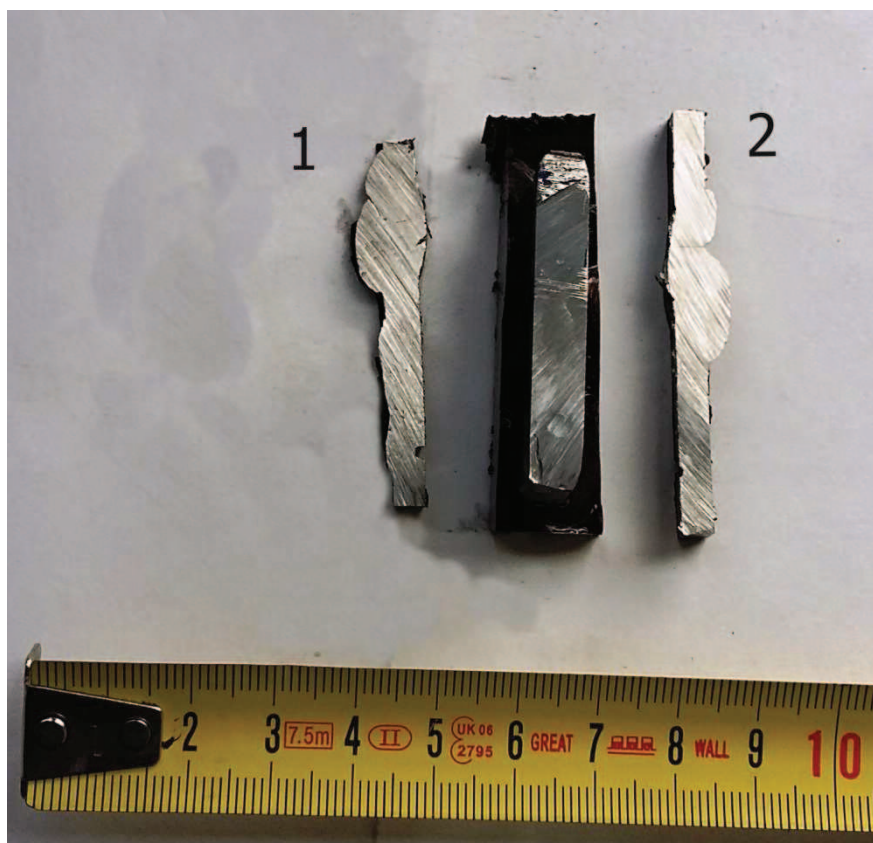


Obr. 24 Pracovní diagram zkoušky tahem při okolní teplotě 20 °C. Počáteční rychlost příčnicku 0.5 mm/min, protažení bylo snímáno na vzorku optickým průtahoměrem.

Porovnáním hodnot s hodnotami garantovanými materiálovým listem [23], je vidět že v hodnotách meze pevnosti R_m , smluvní meze kluzu $R_{p0.2}$ a tažnosti A_5 odpovídají hodnocené vzorky normě. Pokles, nebo změny oproti výchozímu stavu není možné posoudit, neboť výchozí údaje nejsou k dispozici.

7.5 Světelná metalografie

Z víka byly odebrány dva vzorky pro posouzení struktury světelnou metalografií. Výřez materiálu byl veden, vedle rozrážecího plechu který je kolmo navařen na dno víka aparátu, dělení materiálu je vidět na obrázku 25.

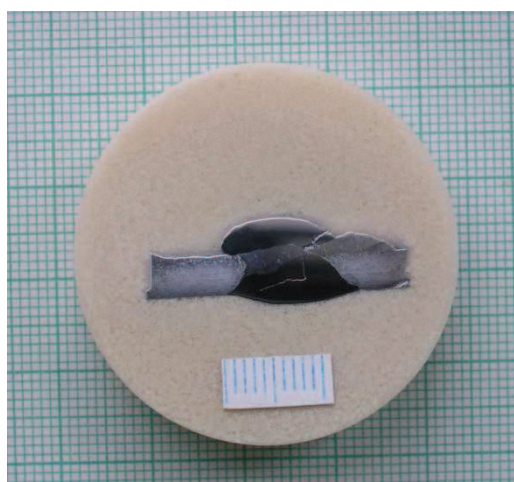


Obr. 25 Odebrané vzorky z víka aparátu.

Vzorky byly, v souladu se standardními metalografickými metodami, po oddělení od zbytku materiálu zality do tekuté epoxidové pryskyřice a po ztuhnutí broušeny, leštěny a na závěr leptány, viz obrázky 26 a 27.



Obr. 26 Vzorek č. 1

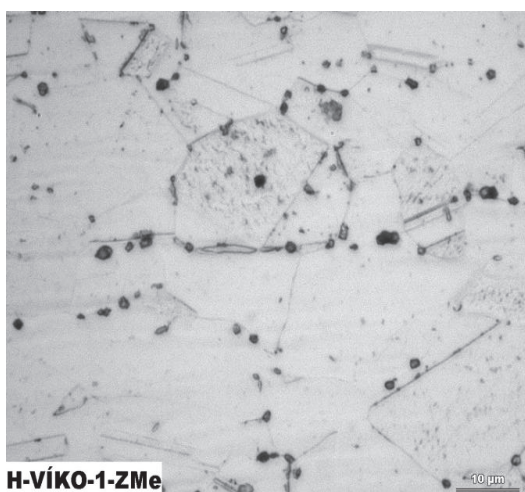


Obr. 27 Vzorek č. 2

Základní materiál víka je tvořen austenitickou strukturou deformačních pásů při tváření. S výjimkou výraznější precipitace karbidů po hranici zrn (obr. 28, 29) nevykazuje strukturní stav závažnější známky degradace a odpovídá charakteristickému stavu pro ocel 1.4306.



Obr. 28 Struktura základního materiálu víka.



Obr. 29 Struktura základního materiálu víka



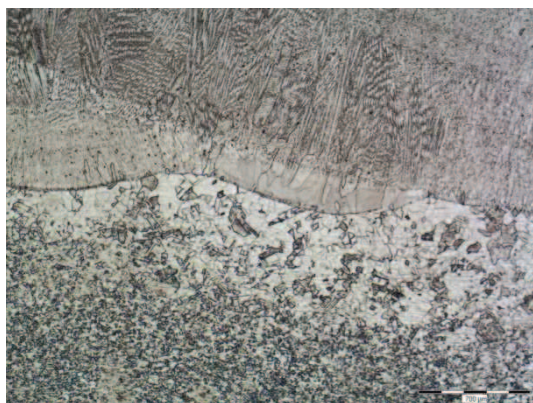
Obr. 30 Charakteristický strukturní stav vyrobené oceli. Velikost zrna 4-5. [26]

Podle databáze výrobních metalografických struktur, částečně přístupných i na www.metallograf.de [26] je vidět na obrázku 30.

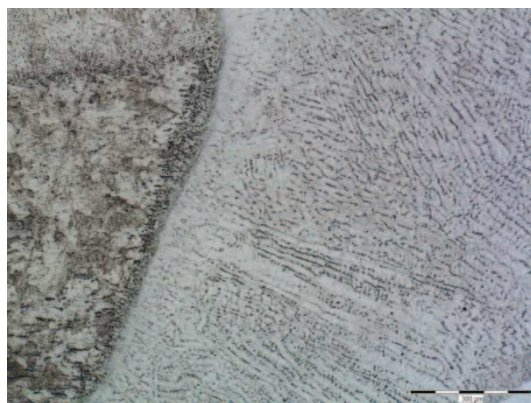
V tepelně ovlivněné oblasti opravného svaru došlo k výraznému zhrubnutí zrn je vidět na obrázcích 31, 32, 33. Svarový kov na obrázku 34 vykazuje silnou precipitaci karbidů po hranicích zrn. Šířka tepelně ovlivněné oblasti a strukturní změny ukazují na vysokou hodnotu vneseného tepla při svařování. Obsah delta feritu zase ukazuje na poměrně rychlé chladnutí.



Obr. 31 Tepelně ovlivněná oblast opravného svaru vzorek č. 2.

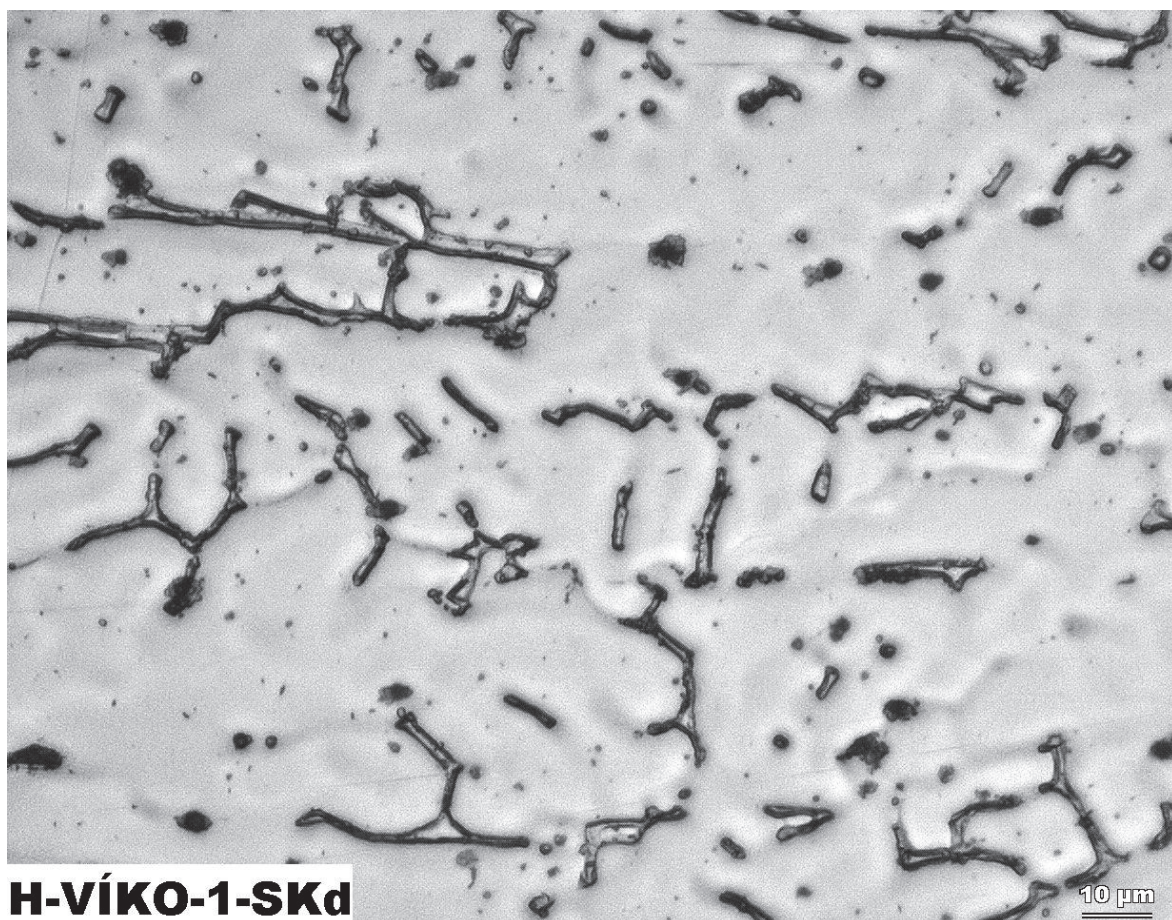


Obr. 32 Tepelně ovlivněná oblast opravného svaru vzorek č. 2.



Obr. 33 Tepelně ovlivněná oblast opravného svaru vzorek č. 1.

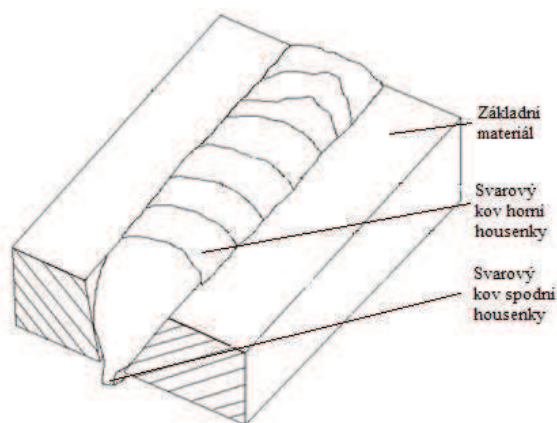
Celkové posouzení stavu a struktury svarového kovu si vynutilo nutnost kontroly složení svarového kovu, tj. kontroly toho, zda byl na opravný svar použit svarový kov doporučený v materiálovém listu. Obecně jsou doporučené postupy pro svařování korozivzdorných ocelí uvedeny v ČSN EN 1011-3. Norma uvádí, že korozivzdorné oceli se svařují malým tepelným příkonem přídavnými materiály pokud možno shodného chemického složení. V případech, kdy svarový spoj pracuje za nižších teplot než 400 °C, je pro svařování možno použít austenitické elektrody s vyšší plasticitou ve svarovém kovu. Zmenší se tak možnosti vzniku trhlin (prasklin) za studena. Velký důraz klade norma na čistotu místa svaru i během svařování.



Obr. 34 Precipitace po hranicích zrn svarového kovu (přeletáno).

7.6 Chemické složení

Nejprve byla provedena kontrola chemického složení základního materiálu víka (tab. 2) v TOO (Tepelně ovlivněné oblasti), která potvrdila, že víko bylo vyrobeno z oceli 1.4306. Následně byla provedena analýza svarového kovu (tab. 3) a to jak spodní housenky (na straně dovnitř nádoby), tak i horní (tab. 4). Porovnání výsledků z tabulek 2, 3 a 4 je vidět na obrázcích 37, 38. Na obrázku 35 jsou vidět názorně místa, kde byla provedena kontrola chemického složení materiálu.



Obr. 35 Rozmístění kontroly chemického složení materiálu na vzorku.



Obr. 36 Ruční analyzátor s označením DELTA PROFESSIONAL

Kontrola chemického složení byla provedena ručním analyzátozem s označením DELTA PROFESSIONAL s technologií X-Act Count. Model DELTA PROFESSIONAL používá velkoplošný SDD detektor, díky němuž dosahuje výjimečných detekčních limitů a citlivosti i pro prvky jako jsou Mg, Al, Si, P, S. Můžeme vidět na obrázku 36.

Z provedeného chemického rozboru svarového kovu plyne, že byl použit jiný než obecně doporučený svarový kov, který je uveden v příložené WPS obrázek 39. Výrobce v materiálovém listu doporučuje např. OK TIGROD 347 Si, což je kov blízkého složení k základnímu materiálu (18%_{hm.} Cr; 8%_{hm.} Ni; stabilizovaný niobem s dobrou odolností proti mezikrystalové korozi).

Na opravný svar byla použita elektroda se skoro 70%_{hm.} Ni, chemický rozbor materiálu je v Tabulce 5. Provedená volba svařovacího materiálu není zcela optimální, i když se doposud občas stále ještě na opravné svary austenitických ocelí používají i elektrody s ještě vyšším obsahem austenitotvorného niklu. Optimální nebyly zřejmě ani podmínky svařování (velikost přehřáté svarové lázně) z pohledu zbytkových napětí.

Tabulka 2. Chemické složení základního materiálu víka, které odpovídá chemickému složení 1.4306

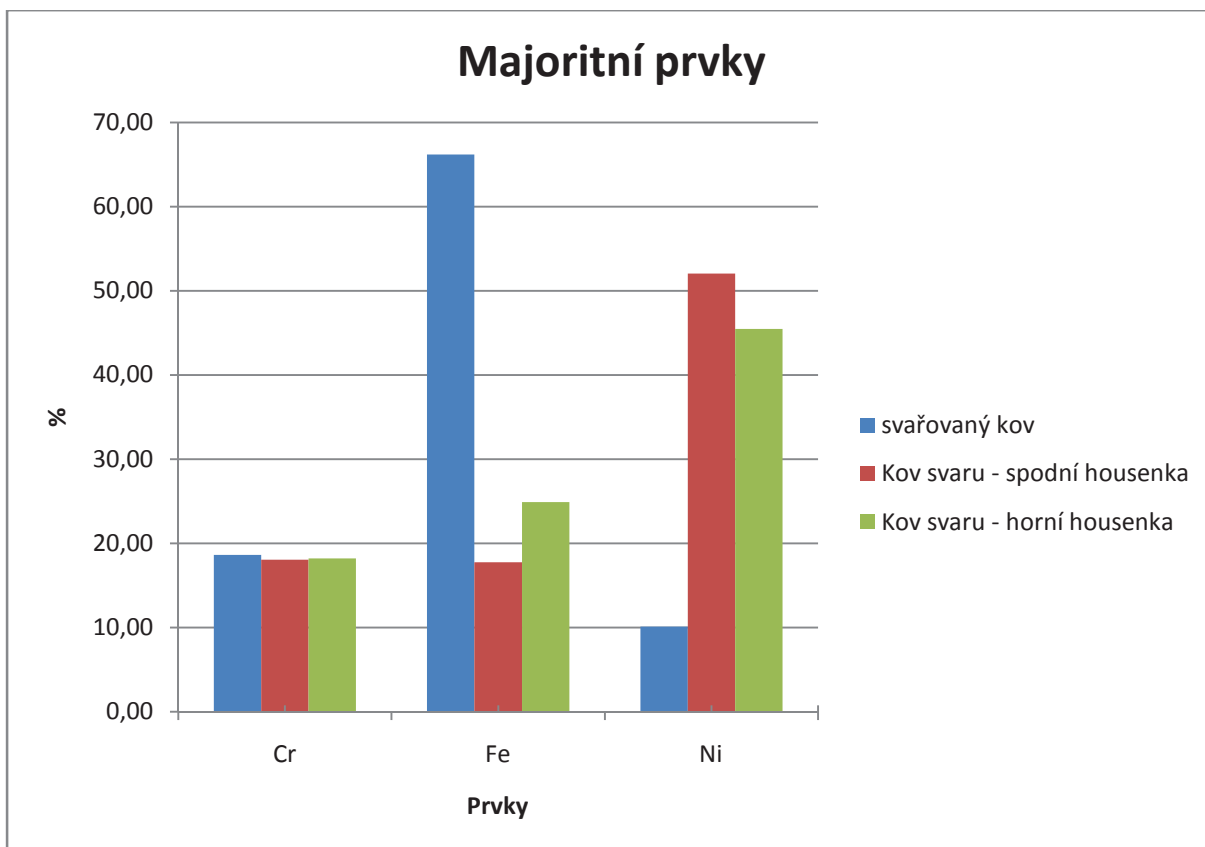
Spectrum	C(%)	Al(%)	Si(%)	Mn(%)	Mo(%)	V(%)	Cr(%)	Fe(%)	Ni(%)
Spectrum 1	0,026		0,52	1,56			18,29	66,31	10,63
Spectrum 2	0,027	0,16	0,54	1,47	0,33	0,09	18,69	66,15	9,87
Spectrum 3	0,026	0,14	0,53	1,51	0,29	0,1	18,46	65,95	10,35
Spectrum 4	0,025		0,51	1,54	0,24	0,11	19,03	66,4	9,62
průměr	0,03	0,15	0,53	1,52	0,29	0,10	18,62	66,20	10,12
Sm. odchylka	0,00	0,01	0,01	0,03	0,04	0,01	0,28	0,17	0,40
Max.	0,027	0,16	0,54	1,56	0,33	0,11	19,03	66,4	10,63
Min.	0,025	0,14	0,51	1,47	0,24	0,09	18,29	65,95	9,62

Tabulka 3. Chemické složení svarového kovu spodní housenky.

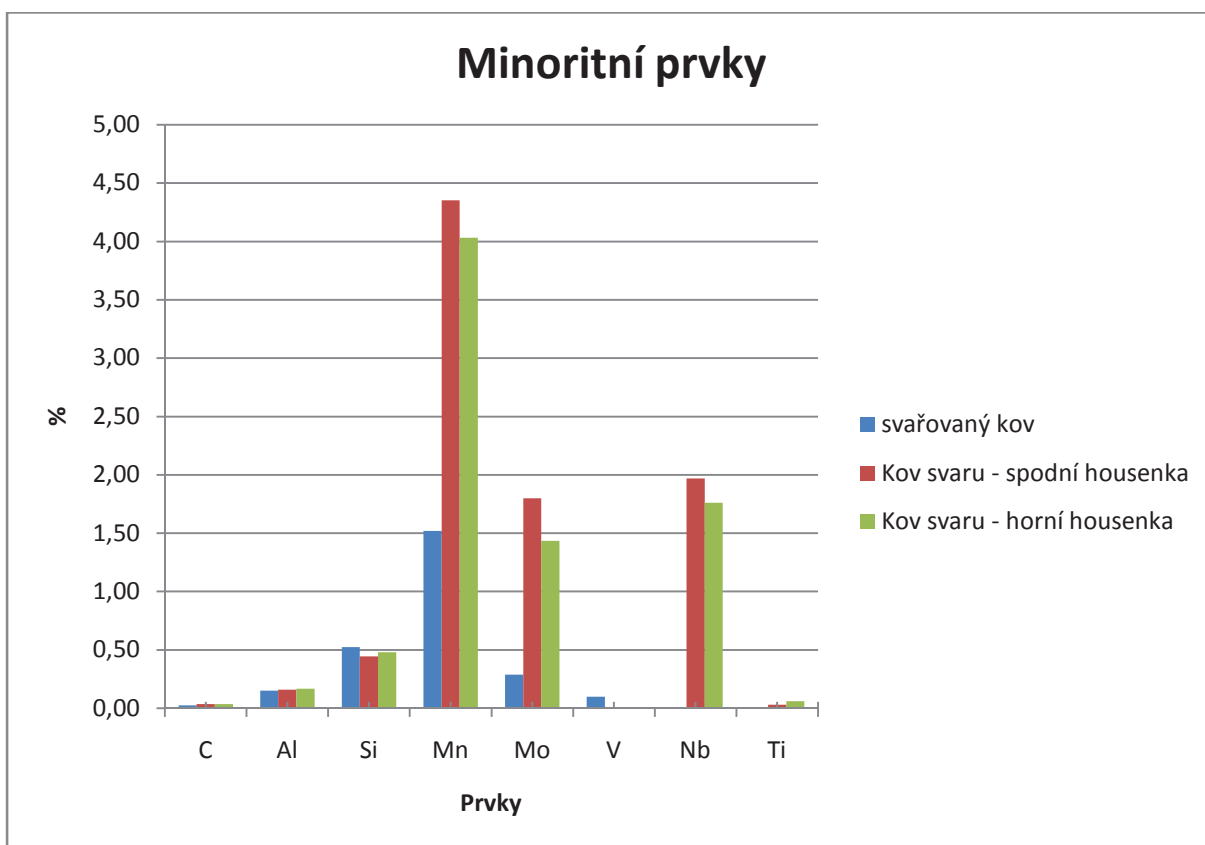
Spectrum	C(%)	Al(%)	Si(%)	Mn(%)	Mo(%)	Nb(%)	Ti(%)	Cr(%)	Fe(%)	Ni(%)
1	0,034	0,16	0,45	4,35	1,8	1,96	0,03	18,03	17,74	52,04
2	0,035	0,15	0,46	4,34	1,8	1,96	0,03	18,04	17,75	52,05
3	0,039	0,17	0,43	4,35	1,8	1,99	0,03	18,09	17,76	52,05
4	0,031	0,16	0,44	4,37	1,8	1,97	0,03	18,12	17,74	52,09
průměr	0,03	0,16	0,45	4,35	1,80	1,97	0,03	18,07	17,75	52,06
Sm. odchylka	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00	0,04	0,01	0,02
Max.	0,039	0,17	0,46	4,37	1,8	1,99	0,03	18,12	17,76	52,09
Min.	0,031	0,15	0,43	4,34	1,8	1,96	0,03	18,03	17,74	52,04

Tabulka 4. Chemické složení svarového kovu horní housenky.

Spectrum	C(%)	Al(%)	Si(%)	Mn(%)	Mo(%)	Nb(%)	Ti(%)	Cr(%)	Fe(%)	Ni(%)
1	0,037	0,17	0,48	4,02	1,44	1,76	0,06	18,21	24,93	45,45
2	0,038	0,16	0,49	4,03	1,43	1,77	0,05	18,22	24,94	45,45
3	0,037	0,17	0,47	4,05	1,42	1,75	0,07	18,23	24,91	45,46
4	0,036	0,17	0,48	4,01	1,45	1,75	0,06	18,21	24,9	45,48
průměr	0,04	0,17	0,48	4,03	1,44	1,76	0,06	18,22	24,92	45,46
Sm. odchylka	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01
Max.	0,038	0,17	0,49	4,05	1,45	1,77	0,07	18,23	24,94	45,48
Min.	0,036	0,16	0,47	4,01	1,42	1,75	0,05	18,21	24,9	45,45



Obr. 37 Srovnání chemického složení svarů z tabulek 2,3,4

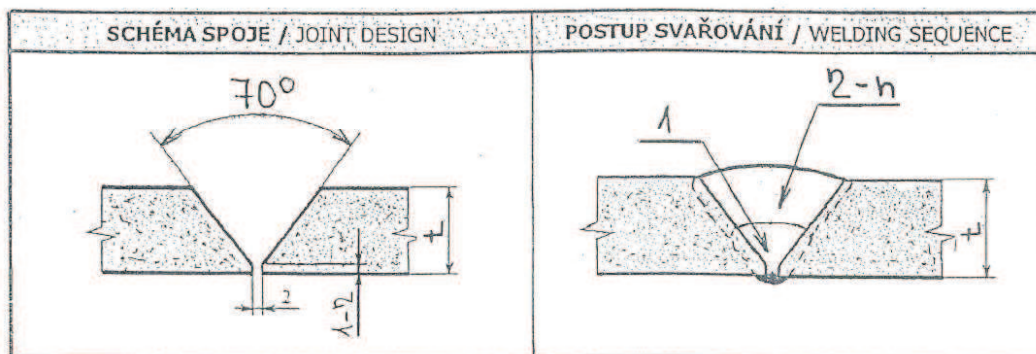


Obr. 38 Srovnání chemického složení svarů z tabulek 2,3,4

Tabulka 5. Výpis z atestu materiálu UTP 068 HH (NiCr20Mn3Nb, dle EN ISO 14172), který byl použit na opravu víka.

C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Cr (%)	Mo (%)	Ni (%)	Cu (%)	Ti (%)	Nb (%)	Fe (%)	Ta (%)
0,02	0,42	5,25	0,007	0,004	19,02	1,34	69,39	0,03	0,07	2,27	2,09	0,003

Stanovení postupu svařování - WPS (ČSN EN ISO 15609-1) Welding procedure specifications - WPS		WPS č.: ZK.Deska - 1 WPS No. Číslo WPQR: ZI-10-305/P02 WPQR No:	
Místo: By: K – PROTOS,a.s.	Přídavný materiál: EN ISO 14343-A: W 19 9 NbSi Filler material: OK TIGROD 347Si ESAB	Další informace: Other information:	
Výrobce: Manufacturer: K – PROTOS,a.s.	Sušení elektrod: Electrode drying: -----	Oprava víka odparky E1401	
Metoda svařování (ISO 4063): Welding process: 141 (TIG)	Ochranný plyn: ČSN EN ISO 14175 (11) Shielding gas: Argon 4.6 Linde		
Druh svaru: Joint type: BW („V“ svar)	Typ a průměr wolfram. elektrody: Tungsten electrode type and diameter: WC20 – 2,4	Broušení , kartáčování	
Zp.přípr.svar.ploch dle ČSN EN ISO 9692-1 Joint preparation method: strojně , ručně	Ochrana kořene / podložení: ANO Argon 4.6 Root shielding / backing :		
Specif. zákl. materiálu:(CR ISO 15608) „8“ P. met. spec: ASME SA-240/SA-240M(304L)	Teplota předehřevu: Preheating temperature: -----	Stehování: Tacking : 141 Způsob měření teplot: Temperature measurement method:	
Svař. tloušťka t : dle skutečnosti Plate thickness: 8mm	Teplota mezi vrstvami: Interpass temperature <130°C		
Vnější průměr D (mm): plech Outside diameter D: -----	Teplné zpracování / časový rozsah: Heat treatment / time range: -----	Max. šířka housenky: Maximum width of bead: -----	
Poloha svařování (ISO 6947): Welding position: PA	Rychlost ohřevu / chlazení: Heating rate / cooling rate: -----		



Parametry svařování Welding data							Poznámka: Remark:
Svarová housenka: Weld layer(s):	1	2	3	4	5	6	
Metoda svařování: Welding process:	141	141	141	141			Každou housenku (vrstvu) řádně očistit (přebrousit)!
Průměr přídav. drátu (mm): Diameter of filler metal (mm):	2,0	2,4	2,4	2,4			Dodržovat bezpečnost práce dle ČSN 050600 ,
Proud (A): Current (A):	80 - 120	80 - 120	80 - 120	80 - 120			050601 , 050610 , 050630.
Napětí (V): Voltage (V):	10 - 13	10 - 13	10 - 13	10 - 13			Vyhl. 87/2000Sb.
Proud / polarita: Current / polarity:	= (-)	= (-)	= (-)	= (-)			
Rychlost podávání: Travel speed:	_____	_____	_____	_____			
Rychlost posuvu: Wire feed speed:	_____	_____	_____	_____			
Přídavný materiál: Filler material(s):	OK TIGROD 347Si	OK TIGROD 347Si	OK TIGROD 347Si	OK TIGROD 347Si			

Obr. 39 WPS – svařovací postup, který měl být použit na opravu trhlin.

7.7 Opravný svar

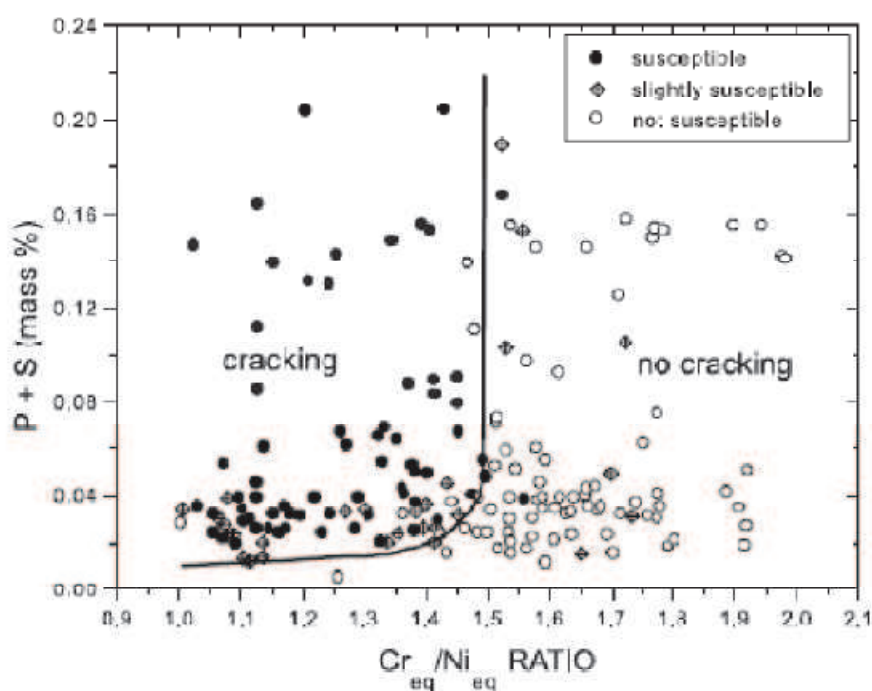
Opravný svar vykazuje mnohačetné defekty typu trhliny (obrázek 41, 42). To dokazuje, že zvolený postup opravy nepřinesl požadovaný výsledek. Podle ústní informace, nebylo víko v rámci přípravy opravného svaru dokonale vyčištěno a do svarové lázně se mohly dostat nečistoty (zbytky vyráběných hnojiv atd.).

Okolo roku 1980 byly ve světě realizovány výzkumné programy, které doložily výrazný vliv i minimálních obsahů síry a fosforu ve svarovém kovu na vznik trhlín. [27], [28] Pokud vypočteme ekvivalentní obsahy Cr a Ni založené na Schafflerově diagramu u použitého svarového kovu (i když zanedbáme změřený obsah uhlíku, který by bylo třeba měřit buď plošně, nebo statisticky i obsah dusíku včetně toho, který se mohl do svaru dostat z nečistot) je i tak poměr ekvivalentního obsahu chromu k ekvivalentnímu obsahu niklu natolik malý, že je nutné předpokládat náchylnost svaru k praskání i při velmi malých hodnotách obsahu fosforu a síry ve svarovém kovu. (Dle následujících rovnic a v závislosti na obrázku 40). [28]

$$Cr_{ekv} = Cr + 1,5Si + 1,37Mo = 18 + 1,5 * 0,45 + 1,37 * 1,8 = 21,1$$

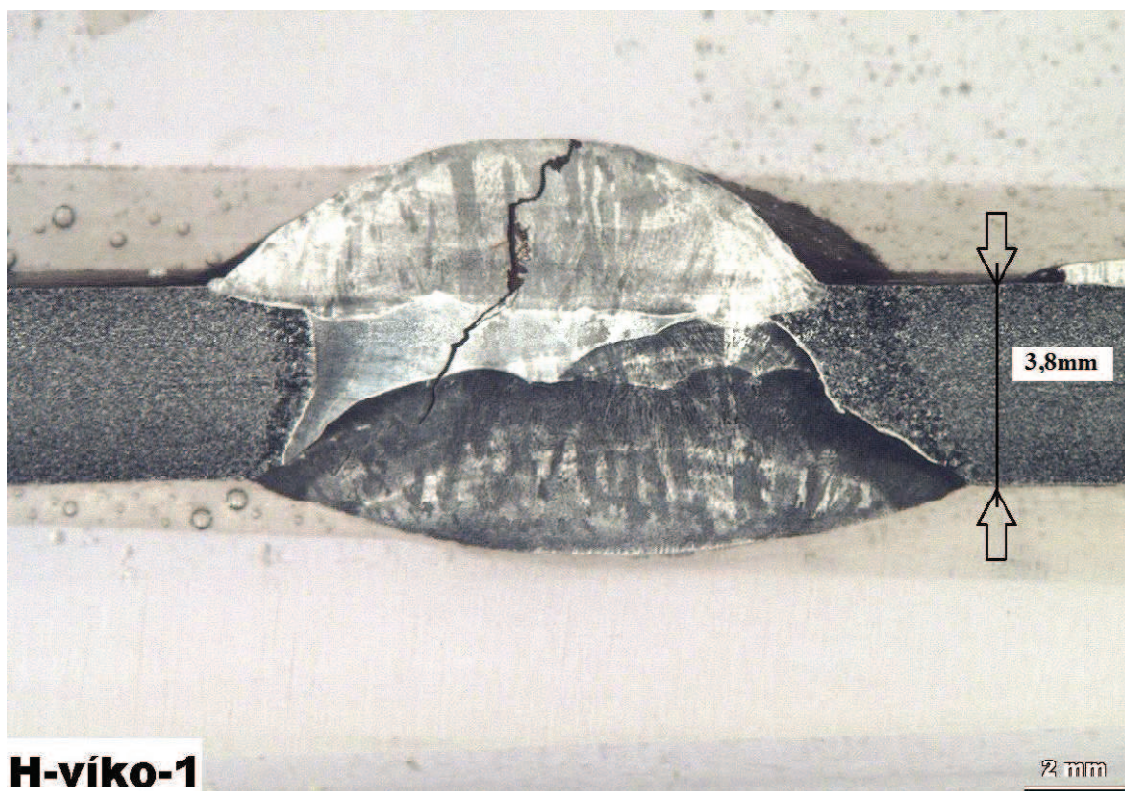
$$Ni_{ekv} = Ni + 0,31Mn + 22C + 14,2N = 52 + 0,31 * 4 = 53,2$$

$$\frac{Cr_{ekv}}{Ni_{ekv}} = \frac{21,1}{53,2} = 0,4$$



Cracking susceptibility during welding of austenitic stainless steels

Obr. 40 Náchylnost svarů austenitických ocelí k praskání podle. [28]



H-víko-1

Obr. 41 Trhlina ve svarovém kovu.



H-víko-2

Obr. 42 Trhlina v tepelně ovlivněné oblasti.

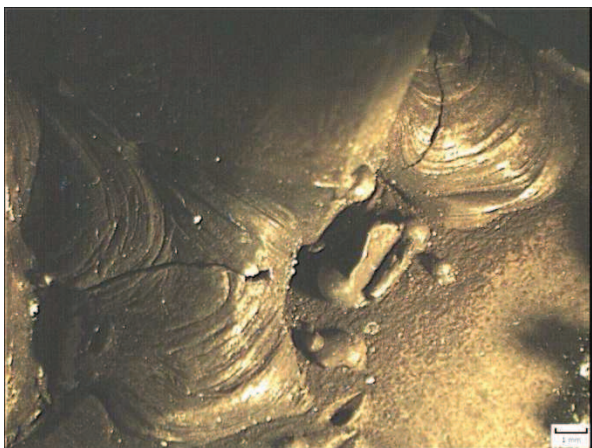
Podrobná prohlídka držáků nárazové desky, které jsou z vnitřní strany přivařeny k víku aparátu, odhalila trhliny i v koncích těchto svarů, které jsou vidět na obrázcích 43 až 46.



Obr. 43 Trhlina nárazové desky ve svaru.



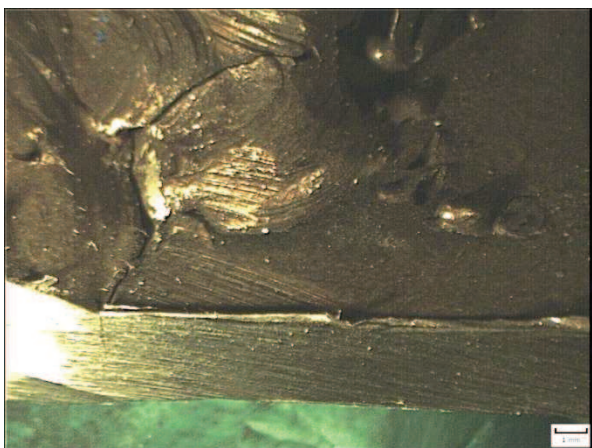
Obr. 44 Trhlina nárazové desky ve svaru.



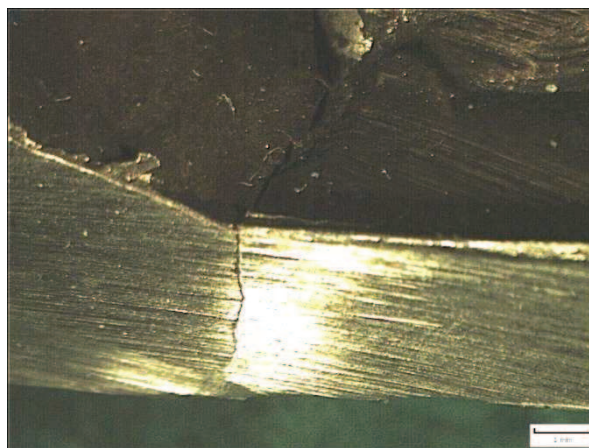
Obr. 45 Trhlina nárazové desky ve svaru.



Obr. 46 Trhlina nárazové desky ve svaru.



Obr. 47 Trhlina nárazové desky ve svaru s přechodem do základního materiálu.

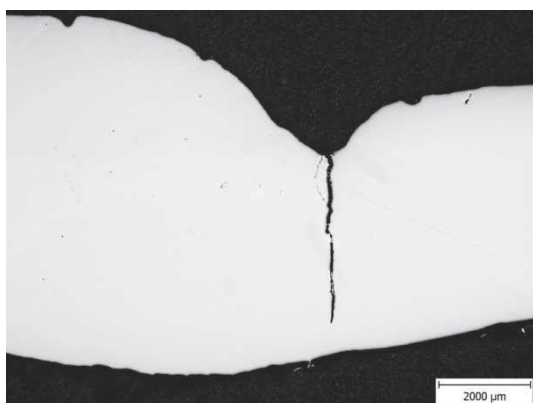


Obr. 48 Trhlina nárazové desky ve svaru s přechodem do základního materiálu.

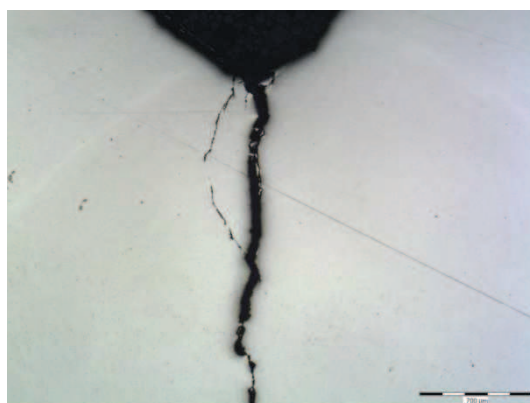
Trhliny ze svarového spoje přecházejí i do plného materiálu a to i mimo tepelně ovlivněnou oblast jak je vidět na obrázku 47-48. Tyto fotografie byly pořízeny na světelném stereomikroskopu Olympus SZ X12.

Z těchto trhlín byly vzaty dva vzorky, které jsou vidět na obrázku 26, 27. Po vybroušení a naleptání, zkoumány na inverzním světelném mikroskopu Olympus GX51 a IX70. Na obrázcích 49 až 52 je vidět detail trhliny jen po vyleštění. Na obrázcích 53 až 57 je vidět struktura materiálu, tepelně ovlivněná oblast i svarového kovu, po naleptání.

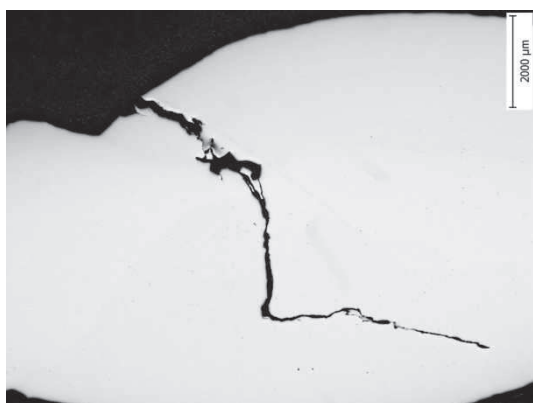
Z těchto obrázků je patrné, že tyto trhliny vznikly ve svarovém spoji pravděpodobně vlivem velkého pnutí materiálu, které bylo způsobeno vícenásobným návarem. Ten podle výpovědi svářečů byl nutný, jelikož jim svar tzv. pěníl – pravděpodobně v důsledku špatného vyčištění materiálu. Další možnost je ta, že byl materiál tzv. nasycen stopovým množstvím síry a fosforu, vyskytující se v dusíkatých hnojivech. Což mělo za následek praskání opravených svarů.



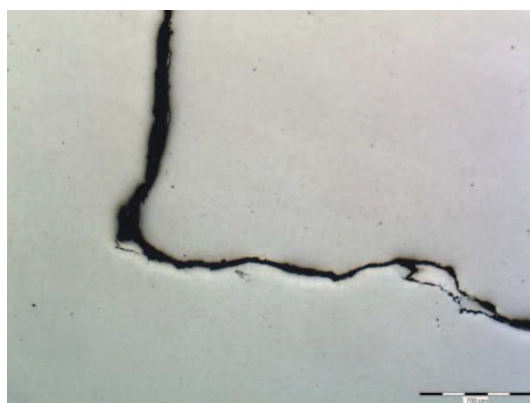
Obr. 49 Trhlina ve vzorku č. 1. Po vyleštění.



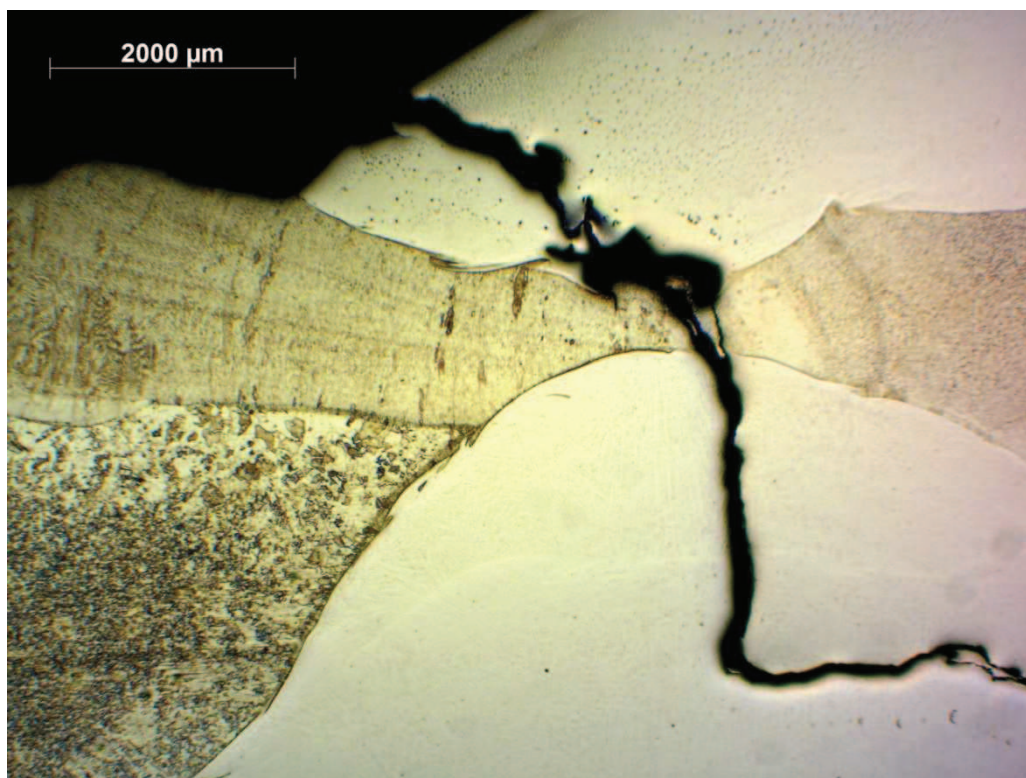
Obr. 50 Detail trhliny ve vzorku č. 1. Po vyleštění.



Obr. 51 Trhlina ve vzorku č. 2. Po vyleštění.



Obr. 52 Detail trhliny ve vzorku č. 1. Po vyleštění.



Obr. 53 Detail trhliny ve vzorku č. 2. Po naleptání.



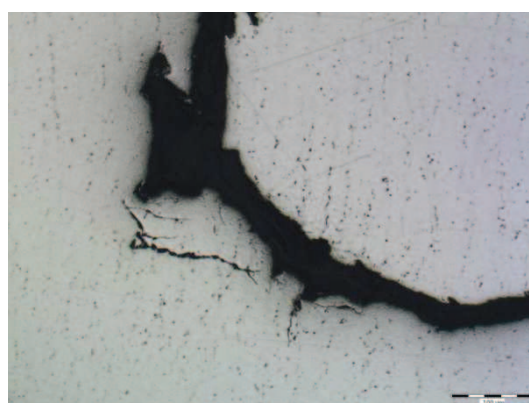
Obr. 54 Detail trhliny ve vzorku č. 1.



Obr. 55 Detail trhliny ve vzorku č. 2.



Obr. 56 Detail trhliny ve vzorku č. 2.

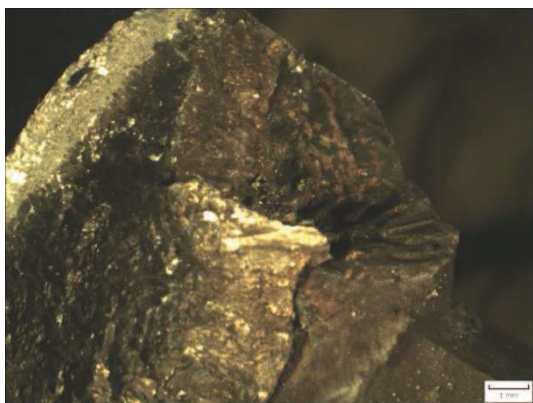


Obr. 57 Detail trhliny ve vzorku č. 2.

Na obrázcích 58, 59, 60 je vidět lomová plocha trhliny, která je následně vidět při penetrační metodě na obrázku 61. Tento lom materiálu, byl proveden ochlazením tekutým dusíkem s následným mechanickým dolomením. Na povrchu lomové plochy je vidět z pravé strany provozní lom, který byl dlouho exponován v provozním médiu, pravděpodobně vznikl po namontování opravovaného víka vlivem provozních parametrů. Uprostřed je vidět houževnatý lom, úplně na levé straně vidíme dolomení materiálu. Tyto fotografie byly pořízeny na světelném stereomikroskopu Olympus SZ X12.



Obr. 58 Dolomení trhliny v místě koncentrátoru napětí u konce svarového spoje provedeného při výrobě aparátu.



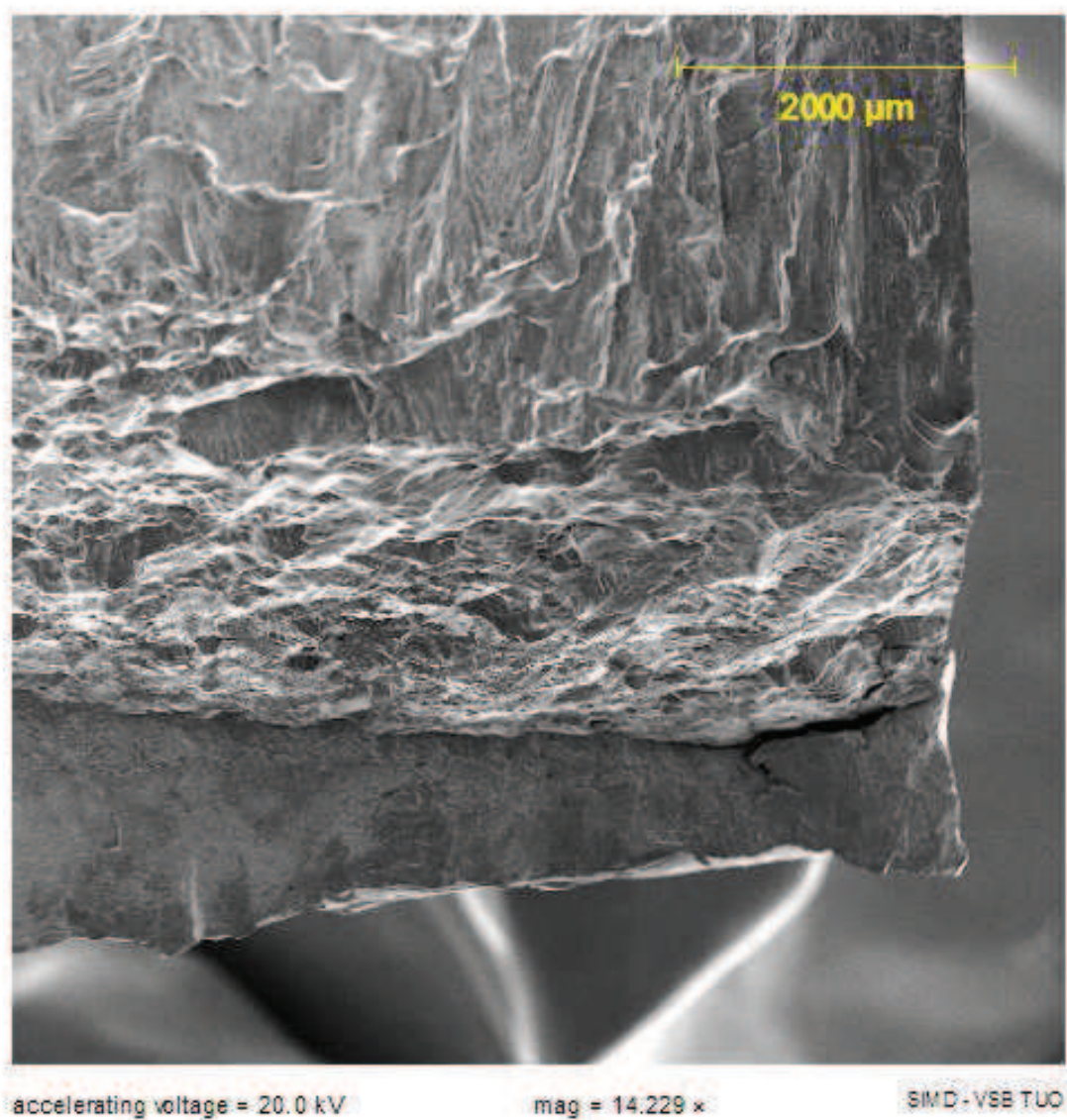
Obr. 59 Detail dolomení



Obr. 60 Detail dolomení

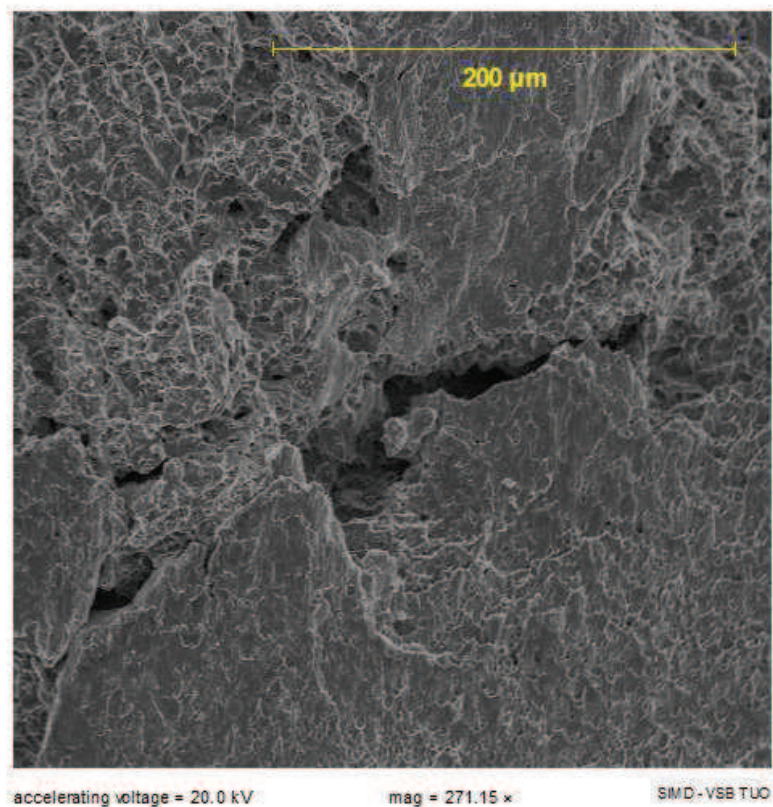
Lomová plocha, která je vidět na obrázcích 61, 62, 63, byla detailně pozorována na řádkovacím elektronovém mikroskopu (SEM) a odmořena v HCl.

Na obrázku 61 se uplatňuje složitá morfologie svarového kovu, závislá na mezifázovém rozhraní, svarový kov je obtížně hodnotitelný, z hlediska morfologie. Ve spodní části obrázku je vidět typické fazety křehkého transkrytalického porušení, typické pro ochlazení N_2 v austenitických materiálech.

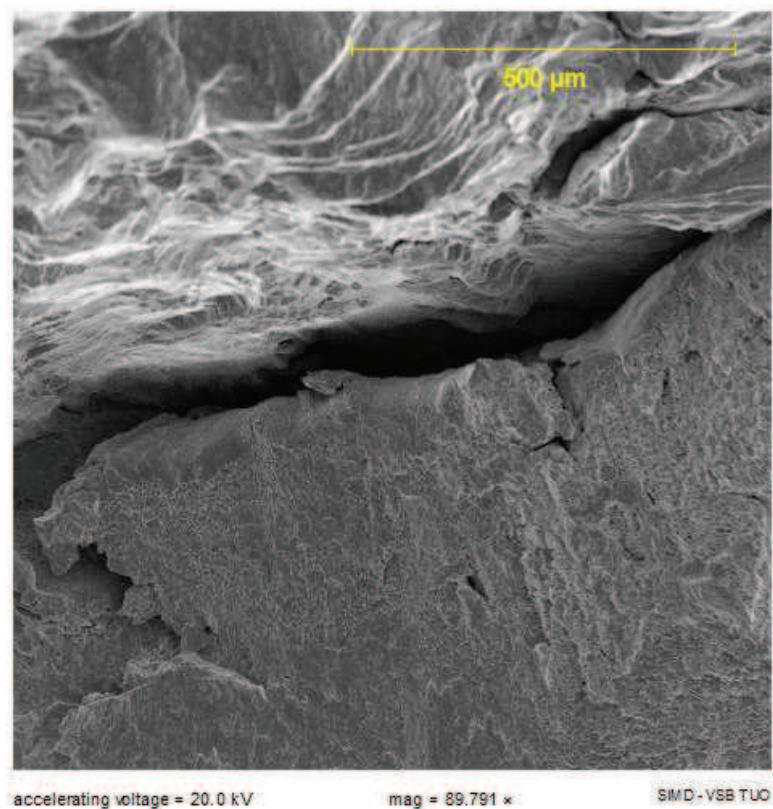


Obr. 61 V horní části svarový kov, ve spodní části dolomení materiálu.

Na obrázku 62 je vidět svarový kov, na kterém je viditelné smykové porušení, lom je z části tvárný – typická morfologie lomu svarového kovu při jednostranné napjatosti. Hladké části můžou pravděpodobně charakterizovat mezifázové rozhraní. Detail tvárného porušení, vidíme na obrázku 67.

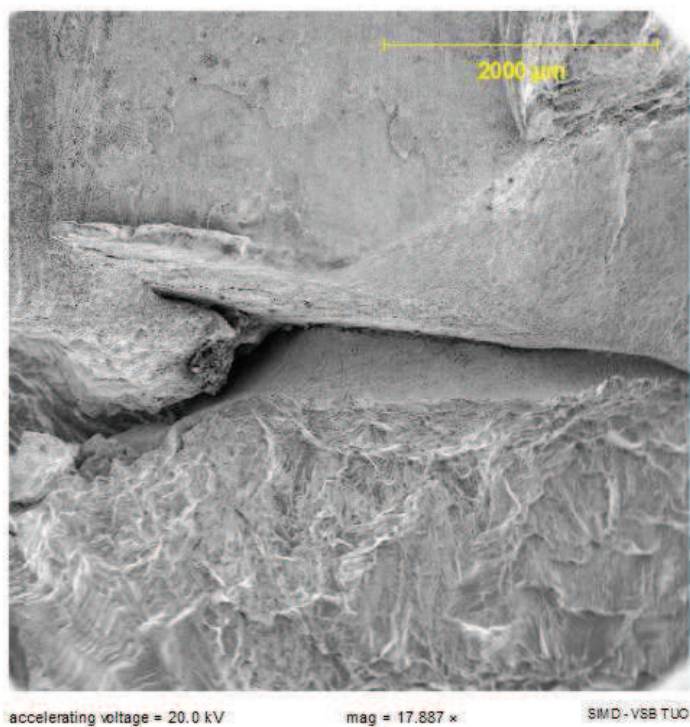


Obr. 62 Svarový kov, na kterém je vidět smykové porušení.

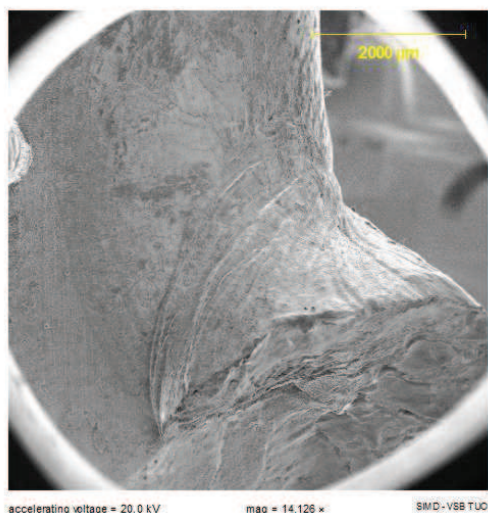


Obr. 63 Tvárné smykové porušení.

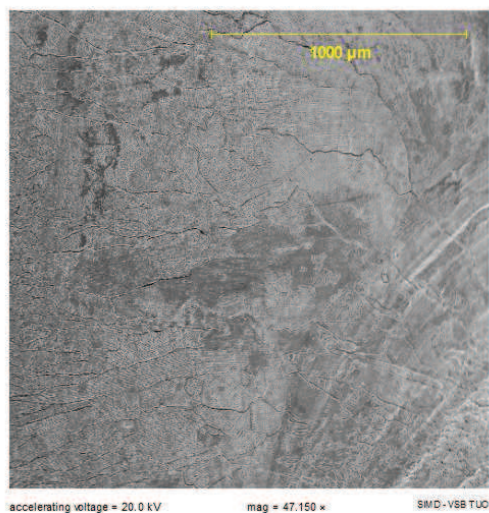
V horní části obrázku 64 je rozrážecí plech, na kterém jsou patrné oxidické úsady dusičnanu amonného, v jehož prostředí bylo víko aparátu provozováno, ve spodní části svarový kov. V tomto rozhraní mezi rozrážecím plechem a svarovým kovem je viditelný studený spoj, vada 401 – nedostatečné spojení (natavení) mezi svarovým kovem a základním materiálem.



Obr. 64 Svarový kov - rozrážecí plech.

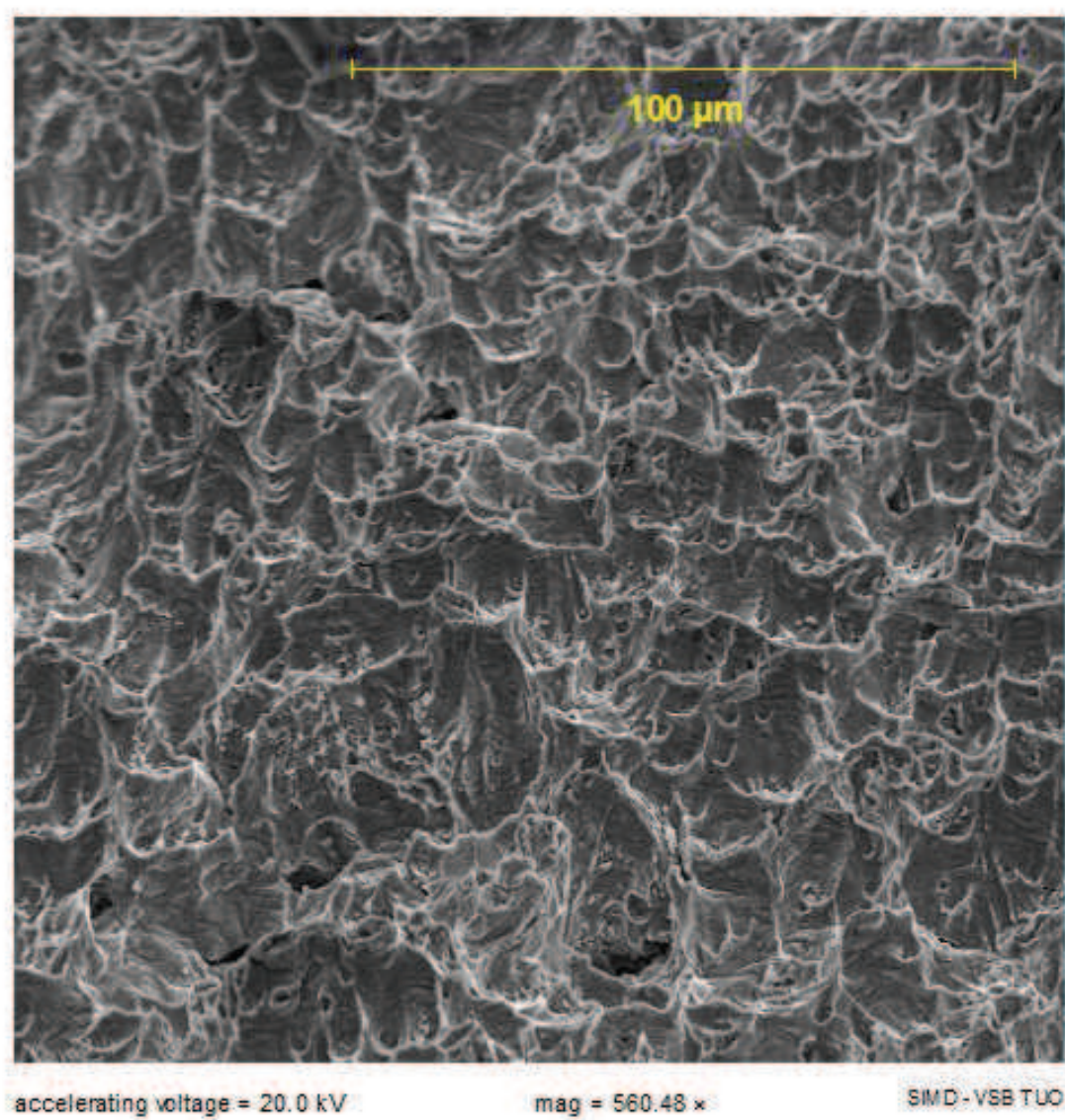


Obr. 65 Dolom materiálu.



Obr. 66 Dolom materiálu.

Na obrázcích 65, 66 je vidět dolom materiálu, který je typický pro podchlazení v N₂. Při větším zvětšení by byli vidět fazety křehkého transkrystalického porušení. Který je charakteristický pro daný typ porušení u austenitických ocelí.



Obr. 67 Tvárný lom.

Na obrázku 68 je vidět trhlina zvýrazněná pomocí kapilární zkoušky. Tato trhlina je detailně zdokumentována na předchozích obrázcích. Tato šíření trhliny by nasvědčovalo vlivu zvýšení napětí ve víku díky koroznímu úbytku tloušťky stěny.

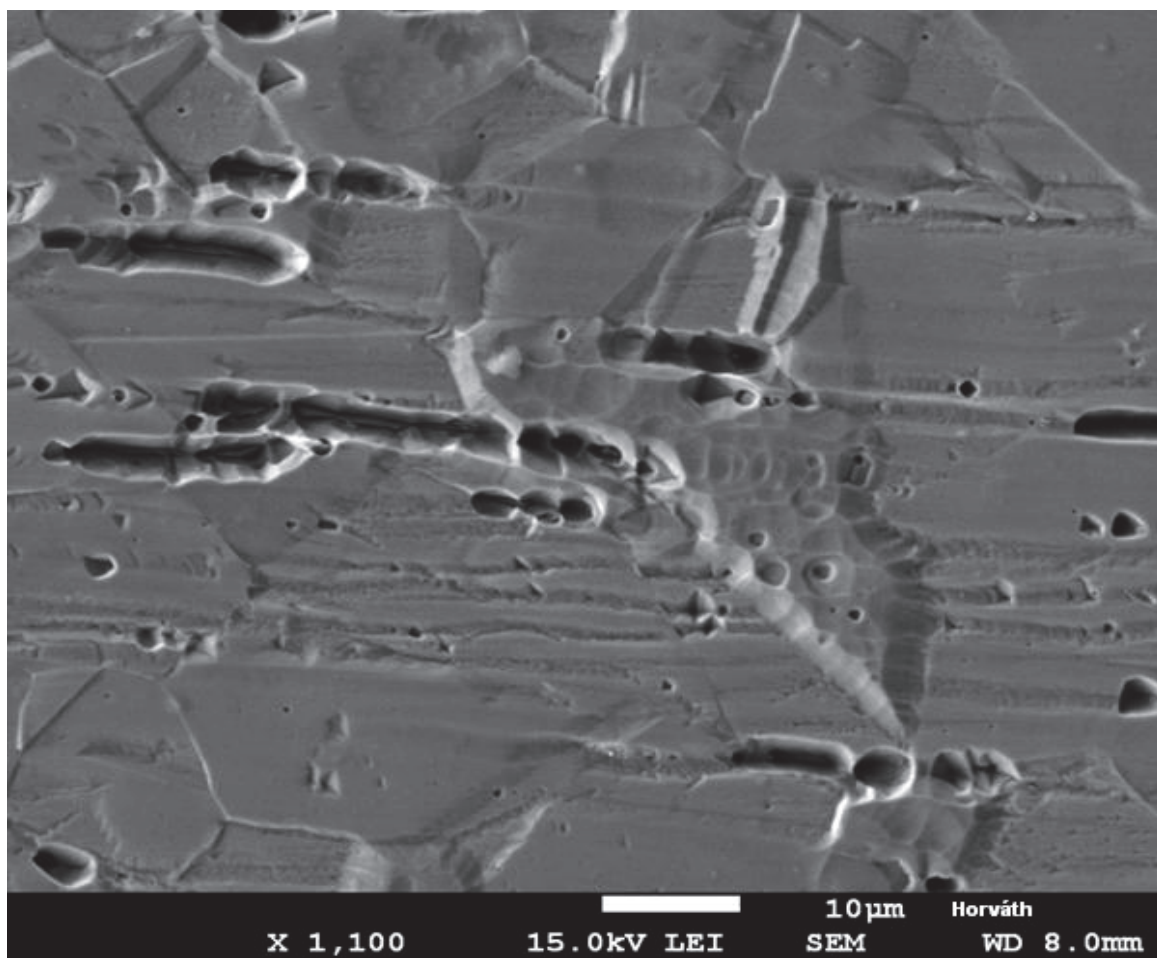


Obr. 68 Ukázka trhliny v místě koncentrátoru napětí u konce svarového spoje provedeného při výrobě aparátu.

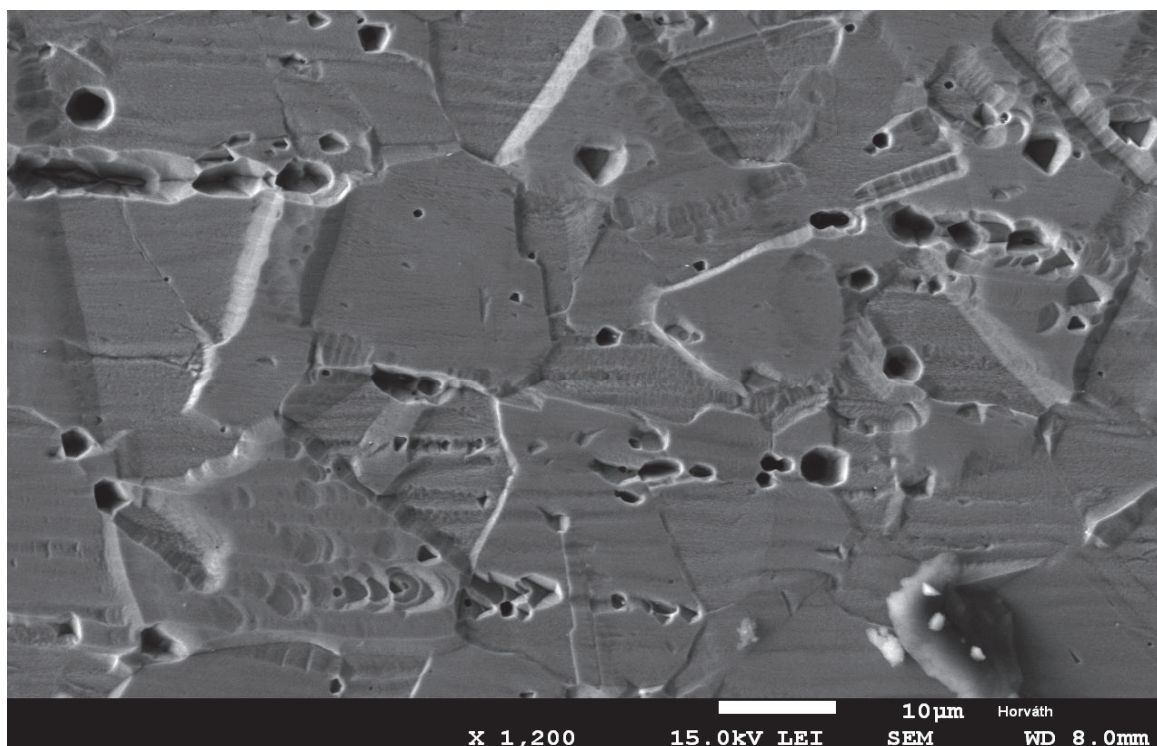
Charakter trhlín v opravném svarovém spoji je ovšem jiný než u trhlín u původních svarů z výroby a odpovídal by spíše trhlinám od teplotní dilatace. U svarového kovu s vysokým obsahem niklu je možné doložit rychlé ochlazení vznikem zbytkového delta feritu, a pokud bude delta ferit detekován ve velikosti umožňující analýzu i přímou analýzou. Tento postup ovšem již vyžaduje použití elektronového mikroskopu.

7.8 Řádkovací elektronový mikroskop (SEM)

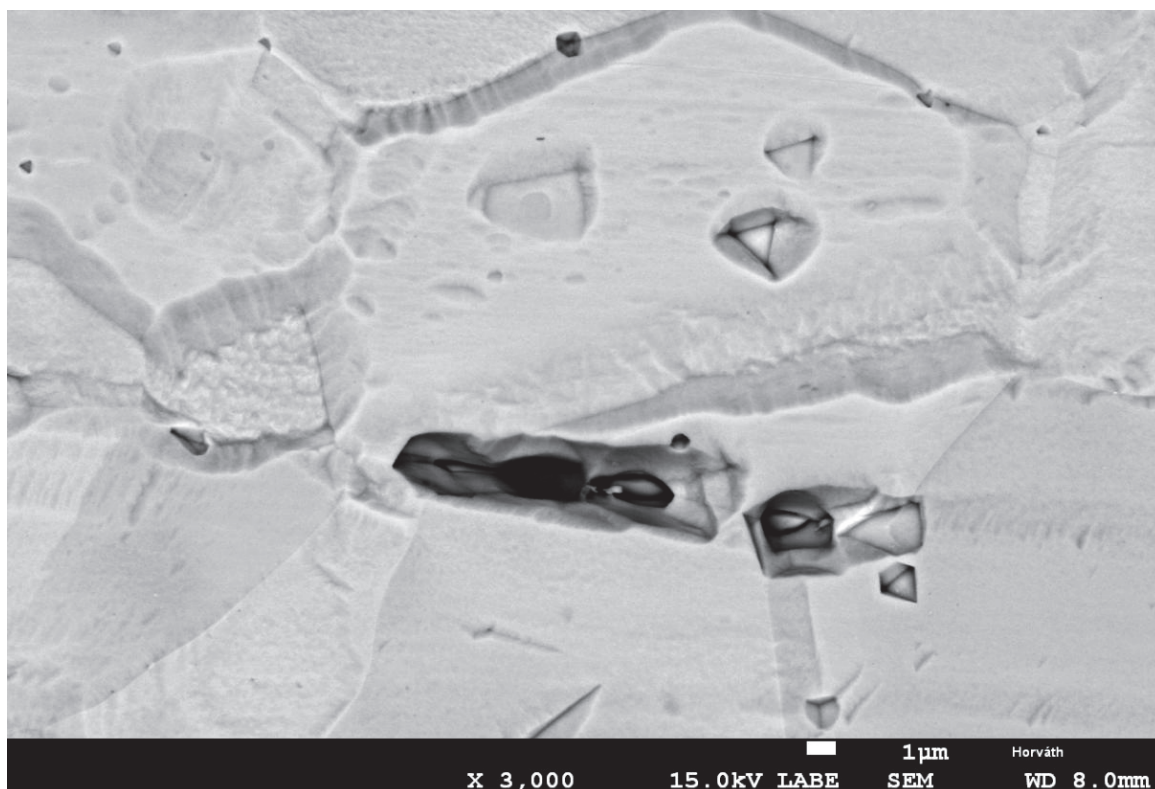
Svarový kov a základní materiál, byl podroben hodnocení na řádkovacím elektronovém mikroskopu. Podélně orientované indikace (obrázek 69, 70, 71) jsou delta ferit, což potvrdily i výsledky analyzátoru. Strukturní stav ukazuje na to, že po provedení opravného svaru byla rychlost chladnutí vysoká. Obrázky 69 až 71 jsou kvůli dosažení kontrastu z mírně přeleptaných vzorků.



Obr. 69 Svarový kov, ve kterém se neuskutečnila úplná austenitická přeměna.

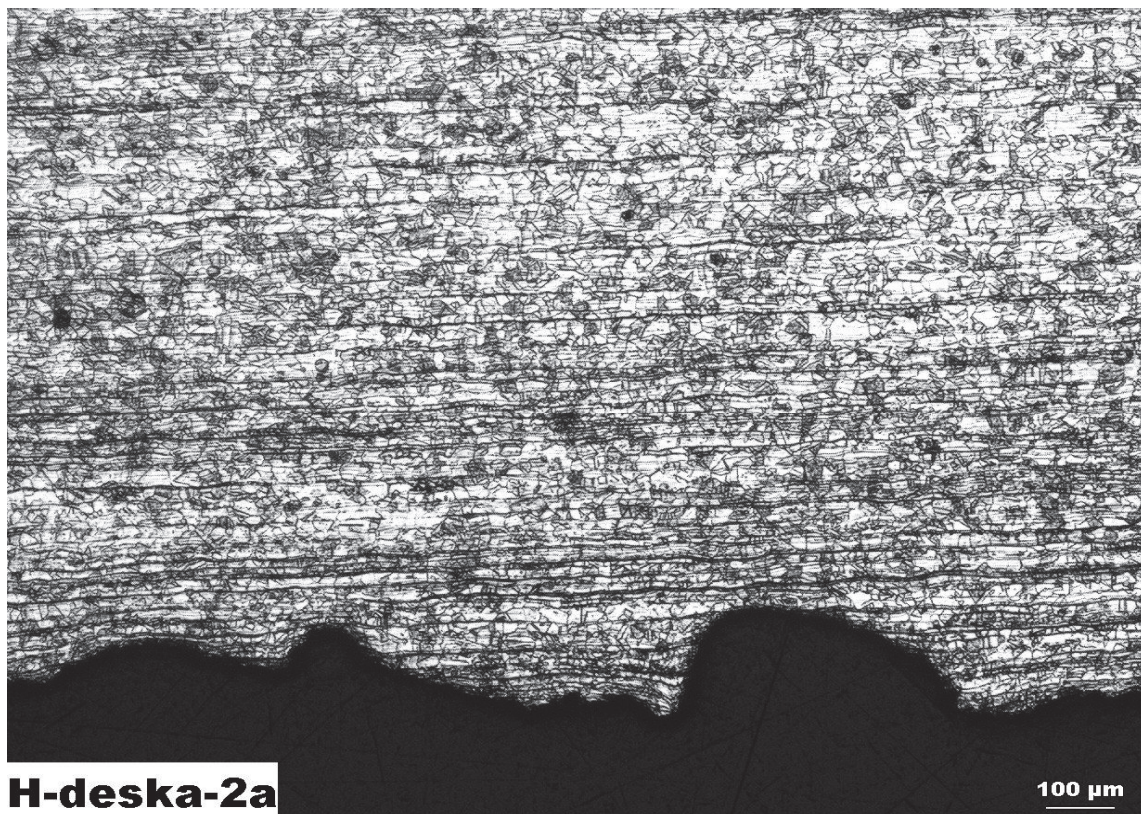


Obr. 70 Svarový kov, ve kterém se neuskutečnila úplná austenitická přeměna.

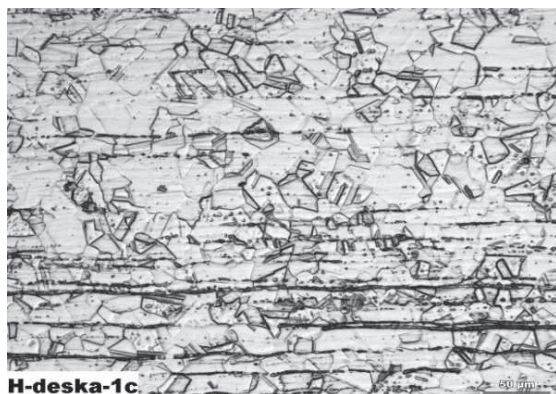


Obr. 71 Svarový kov, ve kterém se neuskutečnila úplná austenitická přeměna.

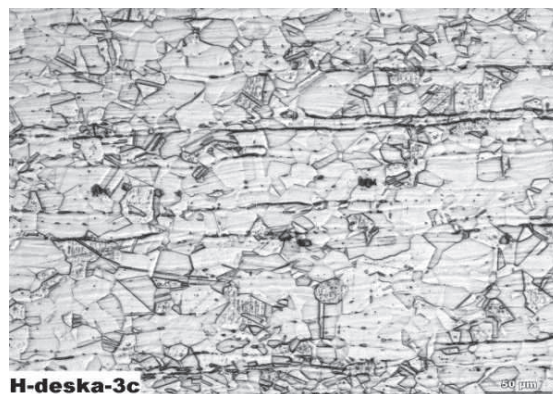
Kontrola nárazové desky vyrobené také z oceli 1.4306, umístěné na víku proti vstupnímu hrdlu, která při vizuální kontrole vykazovala výrazné korozní (možná částečně i erozní) poškození ukázala velmi vysoký obsah delta feritu (obrázek 72 až 74). Nárazová deska je plně magnetická. Austenitické oceli jsou totiž dodávány z hlediska potlačení vzniku trhlin za horka s různým obsahem feritu delta. Množství feritu delta se vyjadřuje feritovým číslem (FN), které označuje magnetickou přitažlivostí feromagnetické fáze přibližně obsah feritu delta v tuhém roztoku austenitu. V rozsahu 0 až 10 % se stanovuje podle EN ISO 8249. Při této aplikaci, která má horní pracovní teplotu 200°C je takto vysoký obsah delta feritu kontraproduktivní z pohledu koroze.



Obr. 72 Nárazová deska z oceli 1.4306 s vysokým obsahem delta feritu.



Obr. 73 Nárazová deska z oceli 1.4306 s vysokým obsahem delta feritu.



Obr. 74 Nárazová deska z oceli 1.4306 s vysokým obsahem delta feritu.

8 Závěr

Oprava trhliny na víku reaktoru z oceli 1.4306 tak, jak byla reálně provedena, byla neúspěšná. A to zejména z nedodržení technologických postupů, které byly na tuto opravu vypracovány. Jedním z hlavních důvodů bylo nedostatečné očištění materiálu, který je velmi citlivý na tuto operaci, při použití metody TIG s přídavným materiálem OK TIGROD 347 Si. Za těchto podmínek nelze materiál svařit, jelikož začne tzv. pění a na povrchu se vytvářejí póry. Pravděpodobně z těchto důvodů svářeči použili metodu svařování el. obloukem s přídavným materiálem NiCr20Mn3Nb. Tato volba přídavného materiálu není zcela optimální, jelikož obsahuje přes 60% Ni, ikdyž se v některých případech ještě stále používá.

Při použití této metody je materiál velmi tepelně ovlivněn, jelikož tepelný výkon je u této metody velký, na rozdíl od metody TIG. Což mělo za následek velké vnitřní pnutí materiálu a v kombinaci se stopovým množstvím síry a fosforu, vyskytující se v dusíkatých hnojivech, který se do svaru pravděpodobně dostal z nedostatečného očištění svařovacích ploch, mělo za následek vytvoření trhlin.

Makroanalýza navařovaného spoje odhalila stopy vedoucí k předpokladu, že došlo k vícenásobnému sváření víka aparátu elektrickým obloukem s následným broušením sváru, což vedlo ke vnesení výrazně vyššího pnutí do materiálu. Konečným důsledkem poté bylo praskání opravených svárů. Toto zjištění bylo v souladu s pozdějším popisem pracovního postupu obsluhy.

Práce provedené na hodnocení vzorků, odebraných z víka mají ovšem i některé obecné výstupy, které budou sloužit jako podklady pro opravy aparátů dlouhodobě pracujících v prostředí s dusičnanem amonným:

- Dodržování přesných technologických postupů prací.
- Chování dlouhodobě provozně exponovaných svařitelných ocelí může být odlišné od chování nových ocelí.
- Před provedením oprav je třeba ověřit, že korozní úbytky nejsou tak velké, že mohou způsobit výrazně větší napjatost v opravené části.
- Korozní úbytky u dlouhodobě provozovaných aparátů a částí zařízení by bylo vhodné kontrolovat i u těch aparátů, které jsou hodnoceny jako plně korozně odolné. Tam, kde tato kontrola ukáže korozní úbytky větší než korozní přírůstek, provést alespoň kontrolu míst s koncentratory napětí na vznik defektů typu trhlina.

- Volba opravovaných částí aparátů a jejich náhrada za nové s předepsáním původní značky (chemického složení) oceli bez znalosti strukturního stavu může vést k výrazně jinému koroznímu chování (viz. Výrazné korozní napadení nárazové desky u kontrolovaného víka).
- Po provedení oprav svařováním na dlouhodobě provozně exponovaných částech je vždy třeba provést kontrolu možných vad vzniklých při opravě.
- Při provádění oprav přímo na provozu je třeba věnovat značnou pozornost dokonalému vyčištění. V provozních prostorách se vyskytují zbytky dusíkatých hnojiv s obsahem síry a fosforu v různých chemických vazbách s dalšími prvky. Pokud se tyto nečistoty nataví do svarové lázně, dojde ke znehodnocení opravy.
- Použití elektrod s vysokou plasticitou pro opravné svary austenitických ocelí nezaručuje ve všech případech dobrý výsledek.

9 Literatura

- [1] ČÍHAL, V. *Mezikrystalová koroze ocelí a slitin*. 2., zcela přeprac. a dopl. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1978.
- [2] MAZANCOVÁ, E., FRIEDRICH, Z. - animace. *Technické materiály*. 1. vyd. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2012. ISBN 978-80- 248-2577-9.
- [3] ČÍHAL, V. *Korozivzdorné oceli a slitiny*. Vyd. 1. Praha: Academia, 1999. Česká matice technická (Academia). ISBN 80-200-0671-0.
- [4] KOUKAL, J., SCHWARZ, D., HAJDÍK, J. *Materiály a jejich svařitelnost*. 1. vyd. Ostrava: Český svářečský ústav, 2009. ISBN 978-80-248- 2025-5.
- [5] RIVLIN, G. V., RAYNOR, G. V. *Phase equilibria in iron ternary alloys: a critical assessment of the experimental literature*. London: Institute of Metals, c1988. ISBN 0-901462-34-9.
- [6] ŠUGÁR, P., ŠUGÁROVÁ, J. *Výrobné technológie: zlievanie, zváranie, tvárание*. 1. vyd. Banská Bystrica: Dali-BB pre Fakultu environmentálnej a výrobnéj techniky TU vo Zvolene, 2009. ISBN 978-80-89090-58-7.
- [7] NĚMEC, M., SUCHÁNEK, J., ŠANOVEC, J. *Základy technologie I*. Vyd. 1. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2006. ISBN 80-01-03530-1.
- [8] SEJČ, P., BENKO, B., GONDÁR, E. *Vybrané technológie - Zváranie a príbuzné procesy*. 1. vyd. V Bratislave: Vydavateľstvo STU, 2006. Edícia vysokoškolských učebníc. ISBN 80-227-2490-4.
- [9] NĚMEC, J. *Svařování korozivzdorných a žáruvzdorných ocelí*. Vyd. 1. Praha: SNTL, 1975. Nakladatelství technické literatury. DT 621.791:669.14
- [10] ČÍHAL, V. *Koroze a ochrana materiálů*. Vyd. 1. Praha: SNTL, 1967. Nakladatelství technické literatury. DT 620.193:669.15
- [11] ORSZÁGH, V., ORSZÁGH, P. *Zváranie TIG ocelí a neželezných kovov*. 1. vyd. Bratislava: Polygrafia SAV, 1998. ISBN 80-88780-21-7.
- [12] NOVÁK, P. *Druhy koroze kovů: Ústav kovových materiálu a korozního inženýrství VŠCHT Praha. Koroze a ochrana materiálu: Věda a výzkum*. 2005, str. 82.

- [13] KOVAŘÍK, R., ČERNÝ, F. *Technologie svařování*. 2. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2000. ISBN 80-7082-697-5.
- [14] MINAŘÍK, V. *Obloukové svařování*. 2., aktualiz. vyd. Praha: Scientia, 2003. ISBN 80-7183-285-5.
- [15] Mlgeardesigns: *svarovani – obalenou elektrodou* [online]. [cit. 2016-04-10]. Dostupné z: <http://mlgeardesigns.blog.cz/1507/svarovani-obalenou-elektrodou>
- [16] HUGHES, S. E. *A quick guide to welding and weld inspection*. Cambridge, England: Matthews Engineering Training, 2009. ISBN 9780791859506.
- [17] KŘÍŽ, V. *Přehled svařování (kurs technických znalostí)*. Vyd. 1. Praha: SNTL, 1975. Nakladatelství technické literatury. DT 621.791
- [18] MUNCASTER, P. W. *Practical TIG (GTA) welding*. Abington, Angleterre : Cambridge, Angleterre: Abington, 1991. ISBN 9781855730205.
- [19] ORSZÁGH, P., ORSZÁGH, V. *Zváranie MIG/MAG ocelí a neželezných kovov*. 1. vyd. Bratislava: Polygrafia SAV, 2000. ISBN 80-88780-36-5.
- [20] WEMAN, K., LINDÉN, G. *MIG welding guide*. Boca Raton, Fla. [u.a.]: CRC Press [u.a.], 2006. ISBN 0849391121.
- [21] POKORNÝ, V. *Učební text Kaučuk k.p.* Kralupy nad Vltavou, 1989, , 65.
- [22] KORITTA, J., PLUHAŘ, J. - *Strojírenské materiály*. Praha : ALFA - Vydavatelstvo technickej a ekonomickej literatúry, 1977. DT 621.002.3.
- [23] FÜRBAACHER, I. *Lexikon ocelí: materiálové listy se zahraničními materiály*. Praha: Dashöfer, 2006-. ISSN 1802-3029.
- [24] PŘIBIL, E., PROTIVA, K., KRČEK, M., HERMÁN, J. *Korozivzdorné a žáruvzdorné oceli poldi a jejich použití II. díl*. Nakladatelství technické literatury. Praha: ve středisku interních publikací, 1989. SIP 05271.
- [25] BRUCE, C. D. *Handbook of corrosion data*. 2nd ed. Materials Park, OH: ASM International, c1995. ISBN 0871705184.

- [26] Metallograf: *Informationen über Stahl für Metallografen*, Werkstoffnummer 1.4306 [online]. [cit. 2016-04-10]. Dostupné z: <http://www.metallograf.de/>
- [27] TAKALO, T., SUUTALA, N., MOISIO, T. Austenitic *solidification mode in austenitic stainless steel welds*, *Metall. Trans.* 10A, pp.1173-1181, 1979
- [28] SUUTALA, N. *Solidification studies on austenitic stainless steels*, Acta Universitatis Ouluensis, Series Technica C 23, University of Oulu, Finland, 1982